



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

ANALÝZA VLASTNOSTÍ MEMS MIKROFONŮ

MEMS MICROPHONES' PARAMETERS ANALYSIS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Roman Halata

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D.

BRNO 2018



Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Roman Halata

ID: 186074

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Analýza vlastností MEMS mikrofónů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- 1) Zpracujte literární průzkum a průzkum trhu na téma MEMS mikrofónů (výrobci, parametry, rozhraní, vnitřní struktura).
- 2) Rozeberte možnosti připojení a dodatečného zpracování signálů u mikrofónů s digitálním rozhraním.
- 3) Navrhněte způsoby ověření základních statických a dynamických parametrů MEMS mikrofónů. Zaměřte se i na normované kalibrační metody.
- 4) Navrhněte a sestavte měřicí pracoviště pro určení požadovaných parametrů mikrofónů. Uvažujte i s měřením v ultrazvukové oblasti.
- 5) Experimentálně určete základní parametry vybraných komerčně dostupných MEMS mikrofónů a porovnejte s údaji výrobce.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Ballou, G. Electroacoustic devices: microphones and loudspeakers. 326 stran. Focal Press, 2009. ISBN 978-0240812670.
- [2] IEC 61094-5. Electroacoustics - Measurement microphones - Part 5: Methods for pressure calibration of working standard microphones by comparison. 2016.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 21.5.2018

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do dílčích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá typy a vlastnostmi aktuálně využívaných MEMS mikrofونů. U digitálních mikrofونů je dále přiblížen způsob vzniku, přenos a vyhodnocování jejich výstupních dat. Práce obsahuje návrh a realizaci měřicího pracoviště a vyhodnocení výsledků měření vlastností digitálních MEMS mikrofونů.

Klíčová slova

Mikrofon, MEMS, frekvenční charakteristika, digitální, National Instruments, měření.

Abstract

This bachelor thesis deals with the types and properties of currently used MEMS microphones. This thesis is scoped to digital MEMS microphones and their digital output. Thesis includes design and realization of workplace and evaluation of results of the measurements.

Keywords

Microphone, MEMS, frequency characteristic, digital, National Instruments, measuring

Bibliografická citace:

HALATA, R. *Analýza vlastností MEMS mikrofonů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 57 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D..

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Analýza vlastností MEMS mikrofونů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **17. května 2018**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské Ing. Zdeňku Havránkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále děkuji svým rodičům, přítelkyni a kamarádům.

V Brně dne: **17. května 2018**

.....
podpis autora

OBSAH

1	Úvod	1
2	Mikrofon.....	2
1.1	Základní typy mikrofonů	2
1.1.1	Uhlíkový.....	2
1.1.2	Kondenzátorový	3
1.1.3	Piezoelektrický.....	3
1.1.4	Elektrodynamický cívkový.....	4
1.1.5	Elektrodynamický páskový.....	4
2	Mems technologie.....	5
2.1	MEMS Mikrofony.....	5
2.2	Výrobci MEMS mikrofonů	6
3	Komunikační rozhraní	7
3.1	Analogový výstup	7
3.2	Digitální výstup.....	7
3.2.1	Digitální rozhraní PDM	7
3.2.2	Digitální rozhraní I2S	10
3.2.3	Digitální rozhraní TDM	11
3.2.4	Způsob vyhodnocení digitálních dat	12
3.2.5	CIC Filtr	13
3.2.6	FIR Filtr	14
4	Statické parametry MEMS mikrofonů	15
4.1	Citlivost.....	15
4.2	Směrová charakteristika.....	16
4.3	Napájecí napětí, spotřeba	16
5	Dynamické parametry MEMS mikrofonů.....	17
5.1	SNR.....	17
5.2	Dynamický rozsah	17
5.3	Kmitočtová charakteristika	18
6	Kalibrační metody.....	19
6.1	Metoda reciprocity.....	19
6.2	Metoda pistonfonu	19
6.3	Srovnávací metoda ve volném poli [17]	20
6.3.1	Metodika kalibrace	21
6.3.2	Postupná kalibrace.....	23
6.3.3	Souběžná kalibrace.....	24
7	Měřící pracoviště	25

7.1	Reproduktor	26
7.2	Referenční mikrofón Brüel & Kjær Type 4939	27
7.3	Předzesilovač G.R.A.S. Type 26AA.....	28
7.4	Zdroj G.R.A.S. 12AB	28
7.5	Mikrofon ICS-41352	29
7.6	Mikrofon SPH0641LU4H-1	29
7.7	Flex evaluation board.....	30
7.8	Software v LabVIEW	30
7.9	NI PXIe – 1082.....	30
7.10	Karta NI PXI – 4461	31
7.11	Karta NI PXI – 7854R	31
7.12	Konektorový blok NI CB-68LP	31
8	Měření	32
8.1	Reálné zapojení měřicího pracoviště	32
8.2	Připojení MEMS mikrofónu	33
8.3	Kalibrace kalibrátorem G.R.A.S. 42AP	33
8.4	KEMO L010	34
8.5	ICS – 41352	35
8.6	SPH0641LU4H-1	37
9	Závěr	38
	Literatura	39
	Seznam symbolů, veličin a zkratk.....	41
	Seznam příloh.....	42

Seznam obrázků

Obr. 1: Konstrukce uhlíkového mikrofonu [1]	2
Obr. 2: Struktura kondenzátorového mikrofonu [1]	3
Obr. 3: Elektrodynamický mikrofon [1]	4
Obr. 4: Elektrodynamický páskový mikrofon [1]	4
Obr. 5 Vnitřní složení MEMS mikrofonu [3]	5
Obr. 6: Podíl na trhu s MEMS mikrofony [4]	6
Obr. 7: Poměr a počet vyrobených kusů MEMS mikrofonů k elektretovým [14]	6
Obr. 8: Porovnání přenosových funkcí šumu modulátorů různých řádů	7
Obr. 9: PDM signál ve frekvenční oblasti [5]	8
Obr. 10: Časové průběhy signálů v převodníku při sinusovém vstupním napětí [6]	9
Obr. 11: Blokový diagram sigma-delta modulátoru 1.řádu s decimátorem [6]	9
Obr. 12: signály I2S sběrnice [7]	10
Obr. 13: Jednakanálový výstup TDM časový diagram [8]	11
Obr. 14: Signál před decimací [15]	12
Obr. 15: Signál po decimaci [15]	12
Obr. 16: Filtr s klouzavým průměrem [12]	13
Obr. 17: Frekvenční odezva CIC filtru [12]	13
Obr. 18: Struktura FIR filtru [12]	14
Obr. 19: Citlivost analogového mikrofonu [9]	15
Obr. 20: Citlivost digitálního mikrofonu [9]	15
Obr. 21: Typy směrových charakteristik [10]	16
Obr. 22: Odezva A-váženého filtru na frekvenci [9]	17
Obr. 23: MP45DT02-M frekvenční odezva [9]	18
Obr. 24: Srovnávací metoda, vlevo postupná, vpravo současná [17]	20
Obr. 25: Schéma měřicího pracoviště č. 1 pro ověření parametrů reproduktoru ...	25
Obr. 26: Schéma měřicího pracoviště č. 2 pro měření MEMS mikrofonů	25
Obr. 27: KEMO L010 [22]	26
Obr. 28: Frekvenční charakteristika KEMO L010 udávána výrobcem [22]	26
Obr. 29: Mikrofon BK type 4939 [21]	27
Obr. 30: BK type 4939 frekvenční charakteristika [21]	27
Obr. 31: G.R.A.S. type 26AA předzesilovač [19]	28
Obr. 32: G.R.A.S. 12AB [26]	28
Obr. 33: Mikrofon ICS-41352 [18]	29
Obr. 34: Evaluation board [20]	30
Obr. 35: Evaluation board layout [20]	30
Obr. 36: NIC CB-68LP [24]	31
Obr. 37: Reálné zapojení pracoviště pro měření s MEMS mikrofony	32
Obr. 38: Připojení MEMS mikrofonu	33

Obr. 39: Kalibrátor 42AP [25]	33
Obr. 40: Naměřená frekvenční charakteristika KEMO L010.....	34
Obr. 41: Směrová charakteristika KEMO L010.....	34
Obr. 42: Citlivost ICS-41352 mikrofon č. 1	35
Obr. 43: Směrová charakteristika ICS-41352 č. 1	35
Obr. 44: Citlivost ICS-41352 mikrofon č. 2.....	36
Obr. 45: Směrová charakteristika ICS-41352 č. 2.....	36
Obr. 46: Frekvenční charakteristika citlivosti SPH0641LU4H-1	37
Obr. 47: Směrová charakteristika SPH0641LU4H-1	37

Seznam tabulek

Tab. 1: Závislost SCK na počtu zapojených mikrofonů ICS-52000 [8].....	11
Tab. 2: Nejistoty jednotlivých kalibračních metod [16]	19
Tab. 3: Vlastnosti reproduktoru KEMO L010.....	26
Tab. 4: Vlastnosti BK Type 4939 [21].....	27
Tab. 5: Vlastnosti ICS-41352 [18]	29
Tab. 6: Vlastnosti SPH0641LU4H-1 [23].....	29

1 ÚVOD

Tato bakalářská práce se zabývá MEMS mikrofony digitálními i analogovými. Okrajově jsou zde zmíněné také ostatní druhy mikrofonů jako uhlíkový, piezoelektrický a elektretový.

Na základě zadání jsem se zaměřil především na digitální kapacitní MEMS mikrofony a jejich komunikační rozhraní. Popisuji zde funkce a vlastnosti CIC, FIR filtrů a digitálních rozhraní PDM, I2S a TDM. Je zde také vysvětlen princip technologie MEMS a uvedeni hlavní výrobci MEMS mikrofonů. Dále se zabývám statickými a dynamickými parametry MEMS mikrofonů, jako je frekvenční rozsah, citlivost, šum mikrofonu anebo odstup signálu a šumu.

Práce zahrnuje návrh a sestavení celého měřicího pracoviště, včetně všech použitých komponentů. Popsána je zde také metodika měření frekvenčních charakteristik citlivostí a směrových charakteristik MEMS mikrofonů. V poslední kapitole jsou zveřejněny výsledky měření, kterých bylo dosaženo.

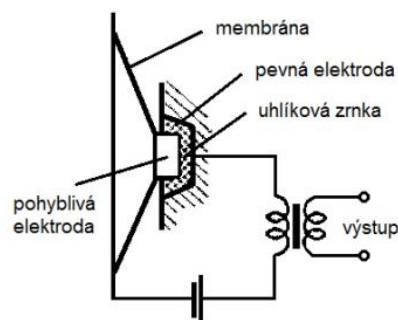
2 MIKROFON

Mikrofon je zařízení, jenž přeměňuje akustický (zvukový) signál na elektrický signál. V elektroakustickém řetězci se řadí na první místo. Má hlavní podíl na kvalitě výstupního signálu. Princip převodu akustického signálu na signál elektrický se liší dle typu mikrofonu.

1.1 Základní typy mikrofonů

1.1.1 Uhlíkový

Uhlíkový mikrofon využívá uhlíkového prachu. Uhlíkový prach mění nepřímo svůj odpor se změnou tlaku, který na něj působí. Tento prach se uloží mezi pevnou a pohyblivou elektrodou a je jimi za pomoci zvuku stlačován. Prach tak mění svůj odpor a tím i protékající proud elektrickým obvodem. Tento typ mikrofonů je stále rozšířen v telefonii. Má velmi omezený kmitočtový rozsah od 200–3400 Hz. Jeho výroba je však velmi jednoduchá a levná. [1]

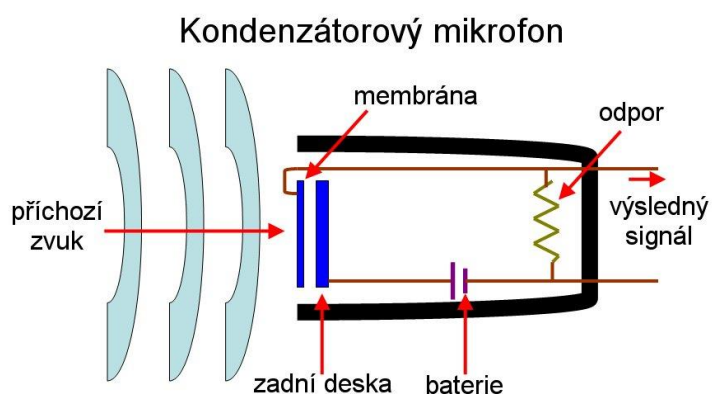


Obr. 1: Konstrukce uhlíkového mikrofonu [1]

1.1.2 Kondenzátorový

Kondenzátorový mikrofon elektrostatický se skládá z pevné elektrody (obvykle perforované), před níž je umístěna pohyblivá elektroda, jenž tvoří membránu. Mezi elektrodami je stejnosměrné polarizační napětí. Pohyb membrány mění kapacitu mezi elektrodami. Tento typ kondenzátorového mikrofonu se využívá zejména pro měřicí účely a pro věrný přenos akustických signálů.

Kondenzátorový mikrofon elektretový se liší od elektrostatického tím, že polarizace není realizována externím polarizačním napětím, ale je tvořena elektretem, tedy nevodivou hmotou, která zůstává permanentně elektricky nabitá a tvoří v mikrofonu membránu. [1]



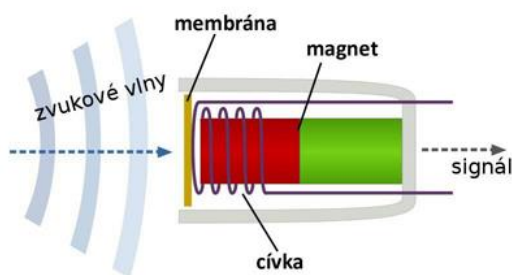
Obr. 2: Struktura kondenzátorového mikrofonu [1]

1.1.3 Piezoelektrický

Využívá piezoelektrického jevu, kdy deformací krystalu (solí), vzniká elektrický náboj. Čím větší je stlačení tohoto krystalu, tím je větší i vzniklý náboj. Provedení takového mikrofonu může být bezmembránové, kdy zvuk přímo působí na krystal, nebo membránové, kdy je kmitání membrány přenášeno na krystal. [1]

1.1.4 Elektrodynamický cívkový

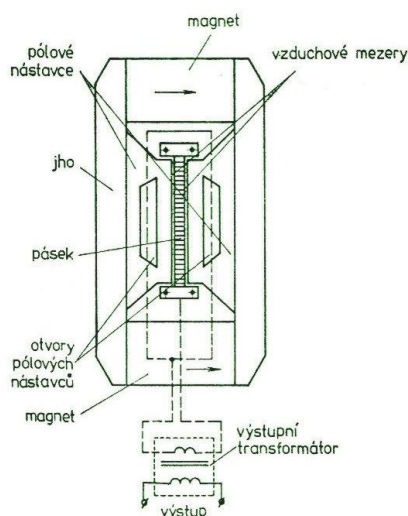
Principem je cívka pohybující se v magnetickém poli permanentního magnetu. Tato cívka je spojena s membránou, která ji mechanicky rozkmitává. Cívka se u levných mikrofonů vine na papírovou kostru, u kvalitnějších mikrofonů bývá samonosná a vinutá buď z měděného nebo hliníkového drátu. V magnetovém systému je velmi malá mezera. Cívka je přitmelena k membráně z dostatečně tuhého materiálu (parazitní kmity). Vyhovující vlastnosti jsou výrobně velmi složité, musí být velmi přesně dodržena tuhost, hmotnost a poddajnost membrány. [1]



Obr. 3: Elektrodynamický mikrofon [1]

1.1.5 Elektrodynamický páskový

Jedná se o nejjednodušší typ elektrodynamického mikrofonu. Má elektromechanický měnič, který tvoří zvlněný hliníkový pásek umístěný v magnetickém poli. Předností tohoto druhu měniče je jeho jednoduchost z hlediska montáže i výroby. Z důvodu velmi malé impedance pásky, je v tělese mikrofonu zabudován přizpůsobovací transformátor.



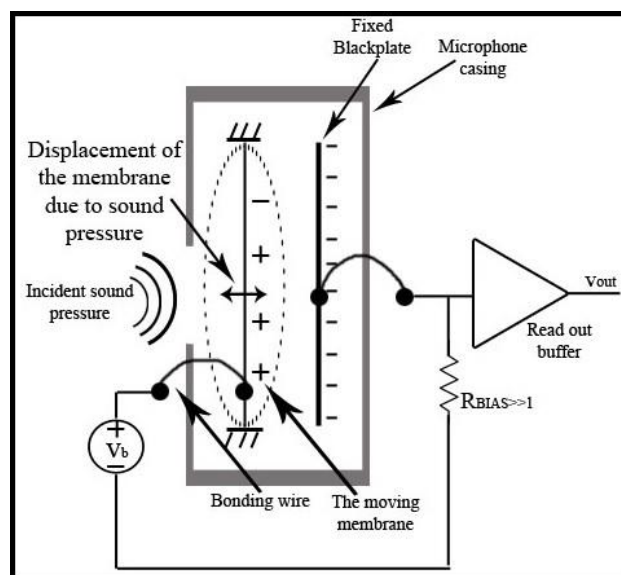
Obr. 4: Elektrodynamický páskový mikrofon [1]

2 MEMS TECHNOLOGIE

Technologie MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) je integrace mechanických elementů, senzorů, akčních členů, řídicí a vyhodnocovací elektroniky na jeden křemíkový substrát. Při výrobě MEMS se využívá stejný materiál, jako u výroby integrovaných obvodů, například křemík, ten však v těchto mikroaplikacích vykazuje vlastnosti materiálu jako je ocel. Takto lze vyrábět mikroskopické akcelerometry, senzory tlaku, mikrofony. Mikrosystémová technika se využívá v biomedicíně (kardiostimulátor), automobilech (airbagy, ABS) a mnoha dalších odvětví. [2]

2.1 MEMS Mikrofony

MEMS kapacitní mikrofony fungují na principu kapacitního mikrosenzoru tlaku. Ty používají pružnou membránu, která reaguje na změnu tlaku změnou kapacity dle obrázku č. 1. Nejčastější, a také trh nejvíce ovlivňující, aplikací MEMS mikrofonů jsou chytré mobilní telefony, které obsahují až 4 tyto mikrofony. [2]

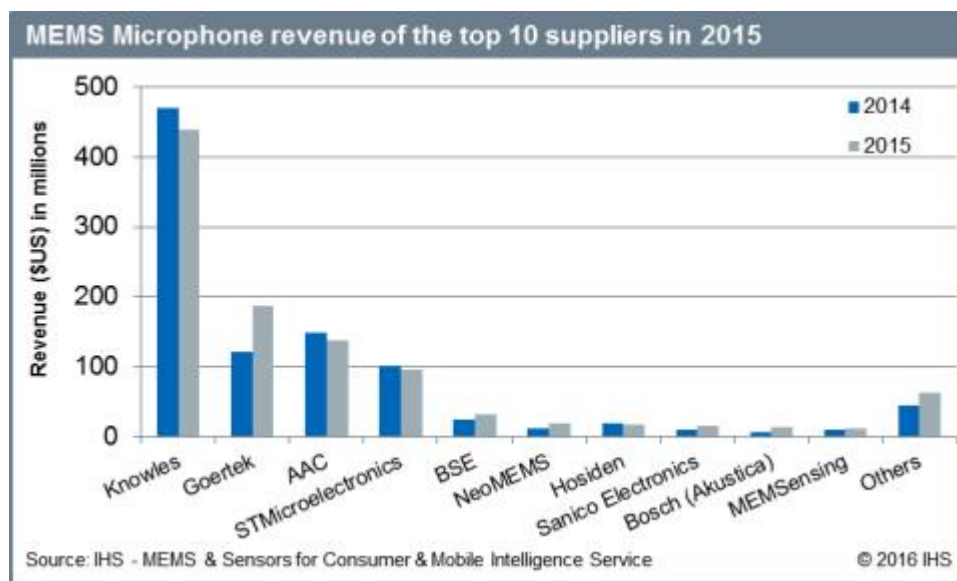


Obr. 5 Vnitřní složení MEMS mikrofonu [3]

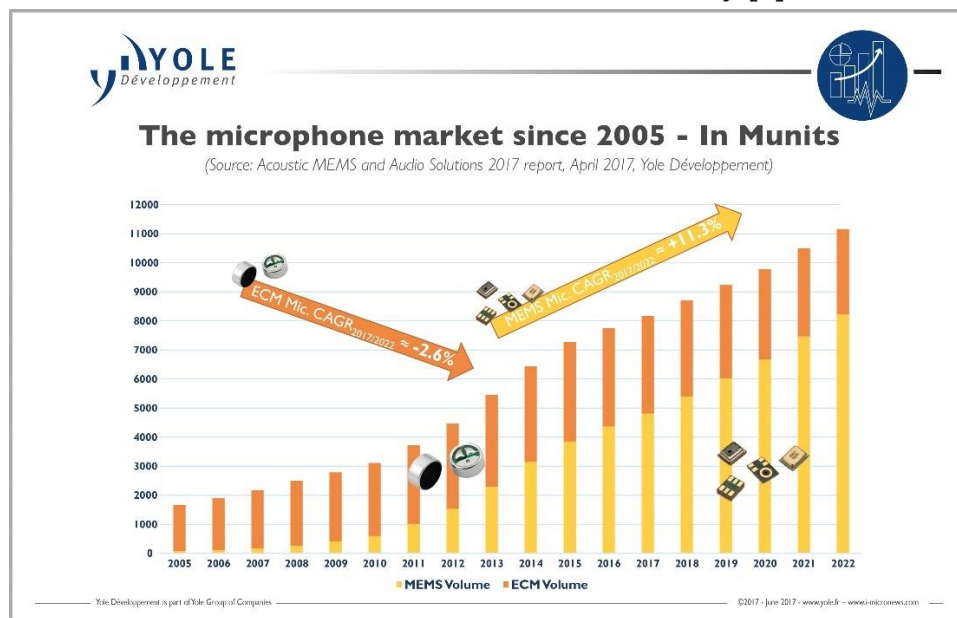
2.2 Výrobci MEMS mikrofónů

Momentálně jsou výrobci MEMS mikrofónů s největším podílem na trhu podle roku 2014:

- Knowles
- STMicroelectronics
- AAC Technologies
- Goertek



Obr. 6: Podíl na trhu s MEMS mikrofony [4]



Obr. 7: Poměr a počet vyrobených kusů MEMS mikrofónů k elektretovým [14]

3 KOMUNIKAČNÍ ROZHRANÍ

3.1 Analogový výstup

Výstupním signálem je zde zesílené výstupní napětí, které vzniká změnou kapacity mezi membránami MEMS mikrofону.

3.2 Digitální výstup

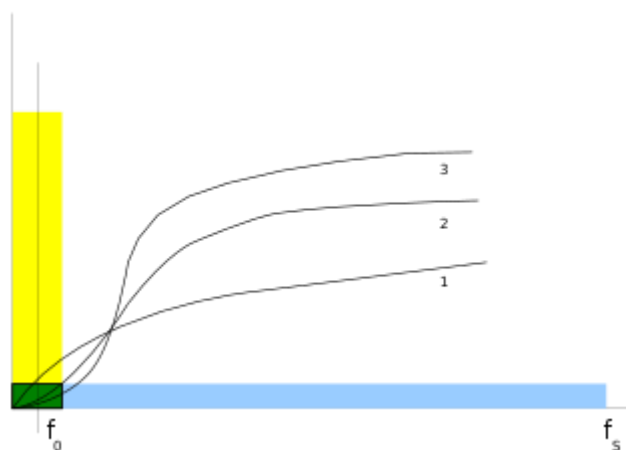
Výstupním signálem je zde analogový signál převeden pomocí ADC na signál digitální. To se provádí pomocí následujících modulací.

3.2.1 Digitální rozhraní PDM

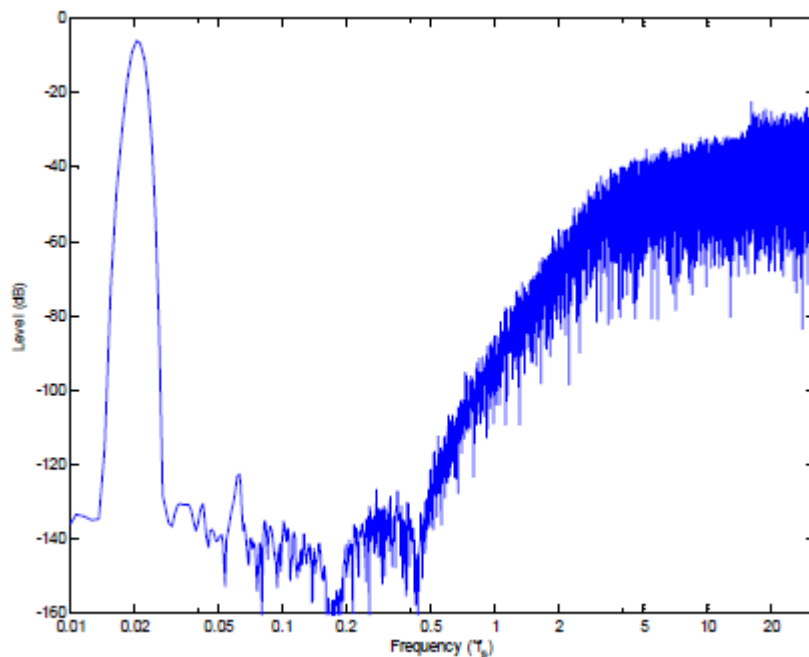
PDM (Pulse-density modulation) je modulace, která přenáší analogový signál na jednobitový signál (bitstream). Využívá pouze 1-bit ADC za velmi vysoké vzorkovací frekvenci obvykle více než 3 MHz. Analogový výstup mikrofónu se nejdříve zesílí v zesilovači a je následně za vysokého kmitočtu zpracován PDM modulátorem. Modulátor signál za vysokého kmitočtu vzorkuje 1-bit ADC. Složitost modulátoru závisí na jeho řádu, který je roven počtu integrátorů, jenž obsahuje. Větším řádem dosáhneme toho, že se šum signálu posune do vyšších kmitočtů (Obr. 9) za cenu větší složitosti výroby a nestability. Typicky se využívá 4 řád, což je dobrý kompromis mezi výkonem a složitostí. Výstupem této modulace je jednobitový signál bitstream. [5]

Popis obrázku č. 10:

1. Modulátor 1. řádu
2. Modulátor 2. řádu
3. Modulátor 3. řádu



Obr. 8: Porovnání přenosových funkcí šumu modulátorů různých řádů



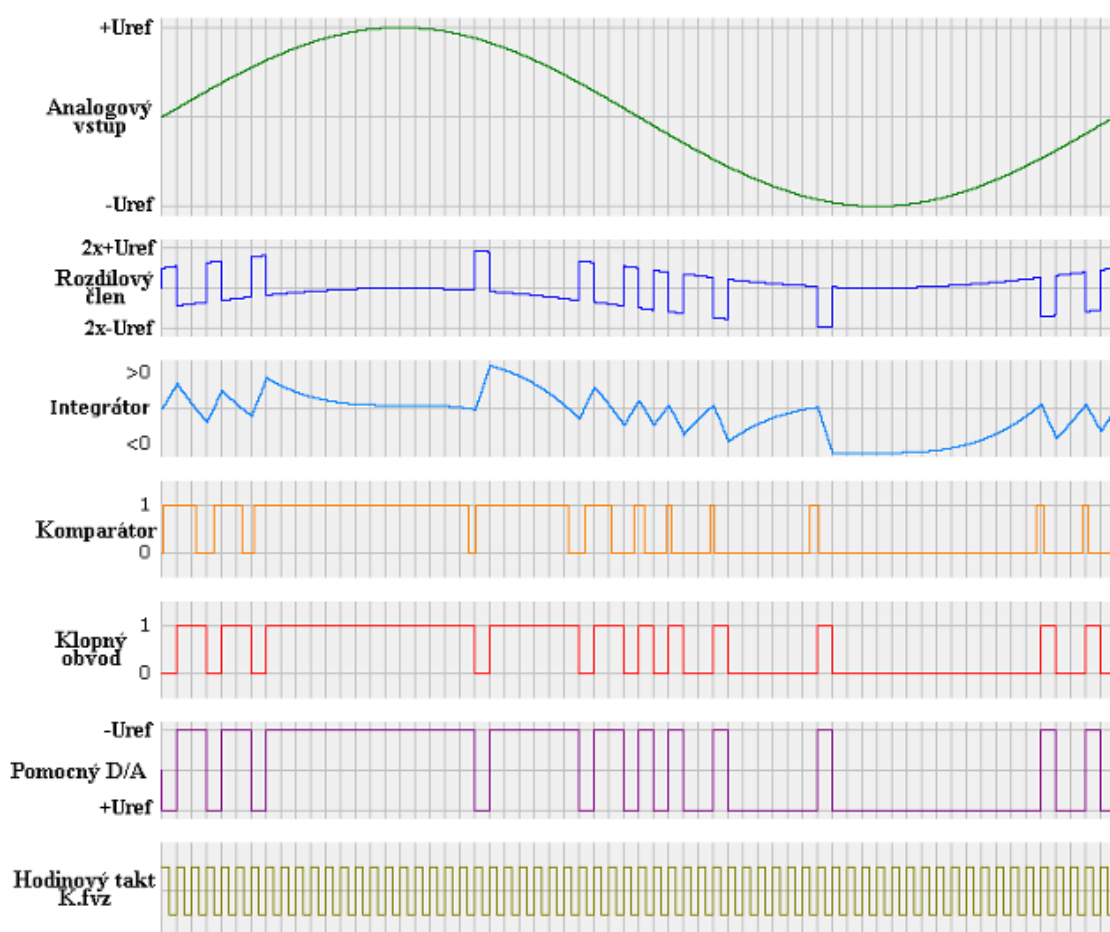
Obr. 9: PDM signál ve frekvenční oblasti [5]

Modulátor $\Sigma\text{--}\Delta$ má na výstupu jednobitové slovo, proto je potřeba za $\Sigma\text{--}\Delta$ modulátor přidat decimátor. Tento decimátor sčítá a průměruje výstupní jednobitový signál a převádí ho na vícebitový. Princip $\Sigma\text{--}\Delta$ modulátoru je znázorněn na obr. 11.

Vzorkovací kmitočet f_{vz} $\Sigma\text{--}\Delta$ modulátoru musí splňovat Shannon-Nyquistův vzorkovací teorém, abychom předešli aliasingu.

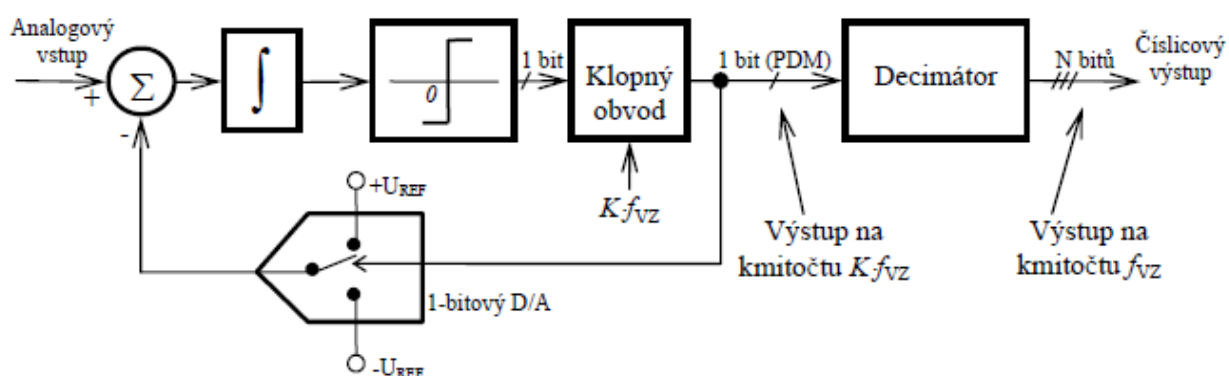
$$f_{max} < \frac{f_{vz}}{2}$$

V tomto vzorci f_{max} představuje maximální kmitočet analogového signálu a f_{vz} vzorkovací kmitočet modulátoru. [6]



Obr. 10: Časové průběhy signálů v převodníku při sinusovém vstupním napětí [6]

Výhodou PDM je jednoduchost, s jakou lze data přivést z mikrofonu do signálového procesoru. Má nízký šum, nízkou cenu a je odolný vůči rušení, proto se často využívají v mobilních telefonech, tabletech a další elektronice. [5]



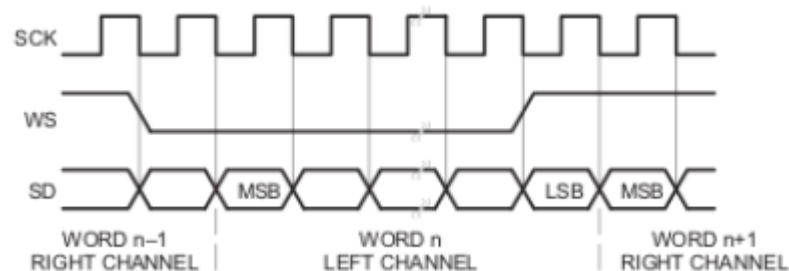
Obr. 11: Blokový diagram sigma-delta modulátoru 1.řádu s decimátorem [6]

3.2.2 Digitální rozhraní I2S

I2S (Integrated Interchip Sound) je standardizovaná sběrnice vytvořená společností Philips, pomocí které lze flexibilně přenášet digitalizovaný zvukový signál.

Aby bylo dosaženo co nejjednoduššího zapojení s co nejmenším počtem vodičů, využívá se třívodičová sériová sběrnice. První vodič se využívá k přenosu dvou časově multiplexovaných kanálů tzv. signál SD (serial data). Druhý vodič je využíván k přenosu informace o kanálu tzv. signál WS (word select). Pomocí posledního vodiče se přenáší hodinový signál SCK (serial clock).

Data jsou pomocí sběrnice přenesena ve dvojkovém doplňku. Jako první se přenáší nejvýznamnější bit (MSB). To umožní, aby přijímač a vysílač mohli mít různou délku slova. Tím je dosaženo toho, že vysílač nemusí vědět, kolik bitů je přijímač schopen pojmout a přijímač nemusí vědět o bitové délce dat, jenž vysílač přenáší. Pokud je přijato více dat přijímačem, než je jeho slovo, jsou přebytečné bity ignorovány. V opačném případě, kdy je přijímačem přijato méně dat, než je šířka jeho slova, jsou chybějící bity vyplněny nulami. Umístění MSB je tedy pevné, zatím co umístění LSB je dáno velikostí přenášených dat. Nejčastěji využívané jsou 24 bitové I2S. [7]



Obr. 12: signály I2S sběrnice [7]

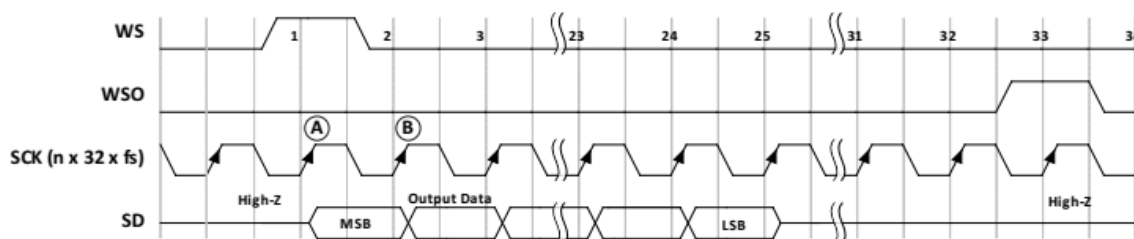
3.2.3 Digitální rozhraní TDM

TDM z anglického time division multiplex je princip přenosu více signálů jedním společným přenosovým médiem, při kterém jsou jednotlivé signály odděleny tím, že každý z nich je vysílán pouze v krátkých pevně definovaných časových intervalech nazývaných časové sloty (timeslot – TS). Nejčastěji se používá rámcové struktury, kde jsou časové sloty seskupeny do větší pravidelně se opakující struktury nazývané rámec. Pomocí TMD tedy lze například zapojit až 16 mikrofonů ICS-52000. Čím větší počet mikrofonů, tím je potřeba větší hodinový signál SCK.

Number of ICS-52000 Microphones	SCK Frequency, based on WS frequency (f_s)
1-2	$64 \times f_s$
3-4	$128 \times f_s$
5-8	$256 \times f_s$
9-16	$512 \times f_s$

Tab. 1: Závislost SCK na počtu zapojených mikrofonů ICS-52000 [8]

Výstupem TDM sběrnice je 24 bitové slovo na jeden kanál. Datové slovo je ve dvojkovém doplňku. Jako první se přenáší nejvýznamnější bit (MSB first). [8]

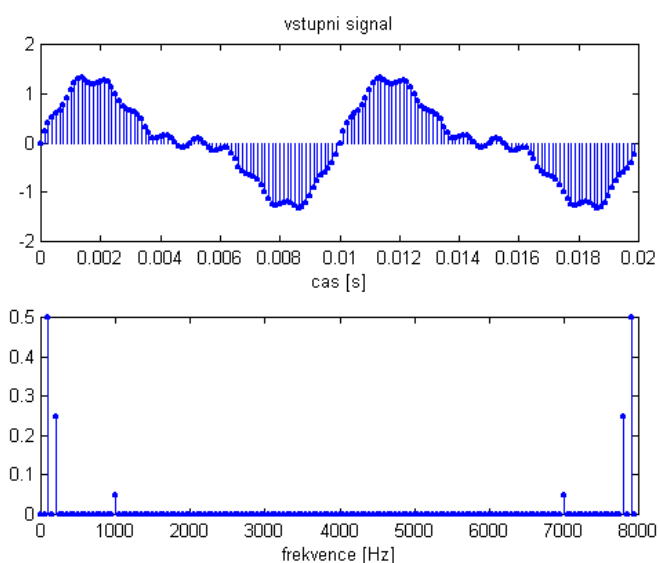


Obr. 13: Jednokanálový výstup TDM časový diagram [8]

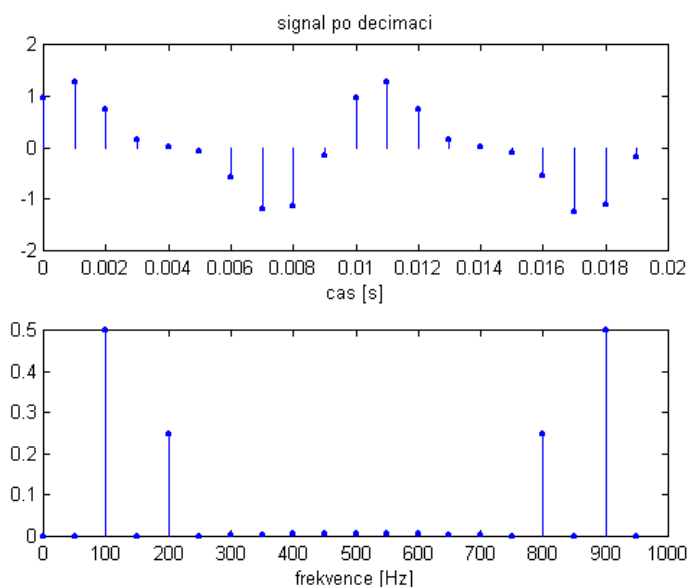
3.2.4 Způsob vyhodnocení digitálních dat

Při využití PDM modulace je signál na výstupu modulátoru jednobitový s kmitočtem jednotek MHz. Šířka pásma snímaná mikrofonom používaném ve slyšitelné oblasti je do 20 kHz. Signál je tedy silně převzorkován. Je tedy potřeba tento signál filtrovat a vytvořit tak signál s nižším kmitočtem a větším bitovým slovem. Decimační filtr se používá pro snížení kmitočtu. Skládá se z filtru CIC (Cascade Integrate Comb) a filtru FIR (Finite Impulse Response), které jsou zapojeny do série. Decimace funguje na jednoduchém principu, kdy se ponechá každý D-tý vzorek signálu. Tím se sníží frekvence D-krát. Jako D se označuje decimační faktor. [12]

Příklad decimace s mírou decimace $D = 8$ je na obrázcích č. 16 a 17. Toto je pouze ukázka decimace, nereprezentuje PDM signál, který nabývá pouze hodnoty 0 a 1.



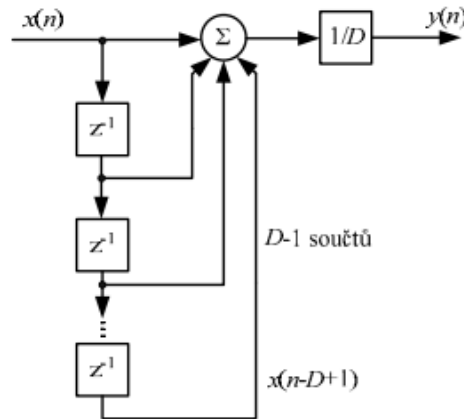
Obr. 14: Signál před decimací [15]



Obr. 15: Signál po decimaci [15]

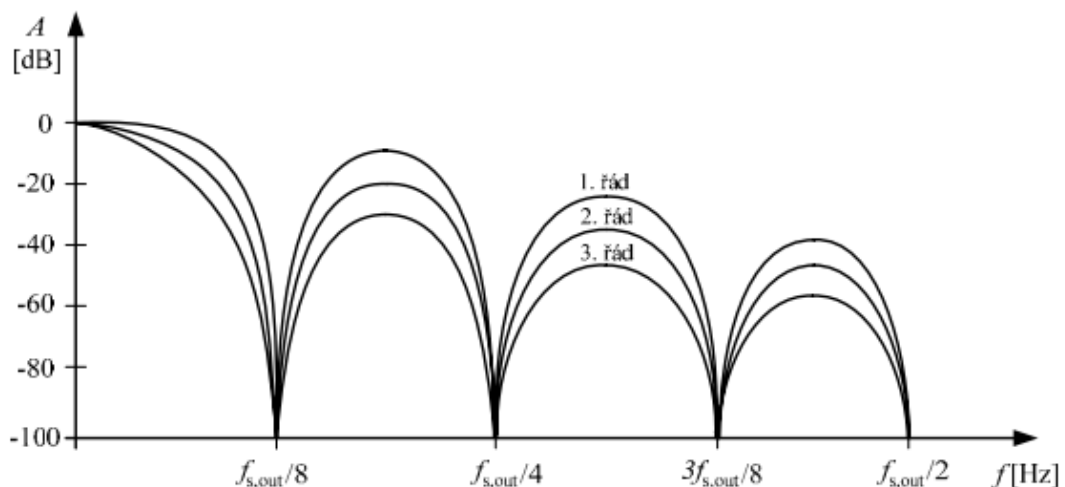
3.2.5 CIC Filtr

CIC filtr (Cascade Integrate Comb) se využívá především tam, kde je důležité decimovat s vysokým decimačním faktorem. Struktura CIC filtru je ve srovnání s FIR filtrem jednoduchá. Nepotřebuje žádné místo na uchovávání koeficientů a také neobsahuje žádné násobičky signálu. CIC filtry se odvíjejí od filtru s klouzavým průměrem (obr. 16). [12]



Obr. 16: Filtr s klouzavým průměrem [12]

Takový filtr jako první sčítá vstupní vzorky a následně je dle decimačního faktoru průměruje. Na výstupu filtru je tak D -krát menší kmitočet vzorků. CIC filtr využívá průměrování hodnot, kde ke vstupnímu vzorku přičte zpožděný vzorek před decimačním členem. Následně je signál podvzorkován a je z něj odečten zpožděný signál po decimaci. Nevýhodou tohoto filtru je aliasing, který lze odstranit zvětšením řádu filtru. S každým řádem se však zvětší útlum v propustném pásmu (obr. 17). Toto však lze kompenzovat filtrem FIR. [12]



Obr. 17: Frekvenční odezva CIC filtru [12]

3.2.6 FIR Filtr

FIR (finite impulse response) jsou filtry s konečnou impulsní odezvou, což znamená že nemají zpětnou vazbu a jsou vždy stabilní. Je obvykle sestaven pomocí základních bloků, jako jsou zpoždění, násobičky a sčítačky. Základní strukturu FIR filtru řádu M vidíme na obrázku 18. [12]

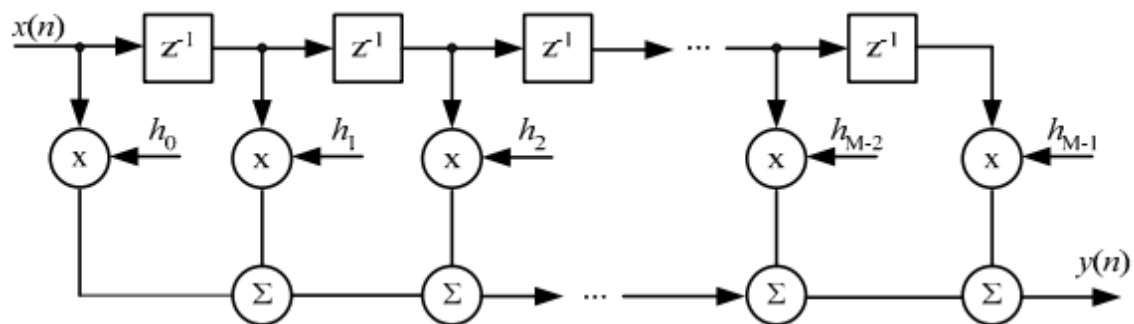
Koeficienty h jsou použity pro násobení. Výstupní signál v čase n je sumací všech zpožděných vzorků násobených odpovídajícím koeficientem. [12]

Výhody FIR filtrů:

- je možnost přesné lineární fázové charakteristiky
- vždy stabilní
- relativně snadná hardwarová realizace
- přechodový jev filtru má konečnou dobu trvání

Nevýhody FIR filtrů:

- pro dosažení dostatečně strmých charakteristik útlumu je zpravidla zapotřebí většího řádu filtru (v porovnání s filtry IIR) s rostoucím řádem roste skupinové zpoždění [13]



Obr. 18: Struktura FIR filtru [12]

4 STATICKÉ PARAMETRY MEMS MIKROFONŮ

4.1 Citlivost

Citlivost je poměr elektrického signálu na výstupu mikrofonu a akustického tlaku, který tento signál vybudil. Pro měření citlivosti se jako referenční vstupní tlak udává 1 Pa nebo 94 dB SPL pro signál o frekvenci 1 kHz. Jedná se o veličinu obecně frekvenčně závislou. [9]

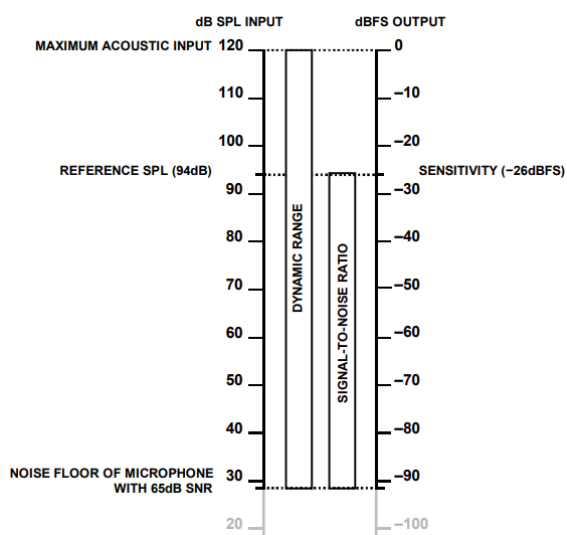
Pro analogové mikrofony se citlivost vyjadřuje v mV/Pa, nebo dBV/Pa. Hodnotu v decibelech lze poté vyjádřit pomocí následující rovnice:

$$L_M = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{M}{M_R} \right) [dBV] [11] \quad (1)$$

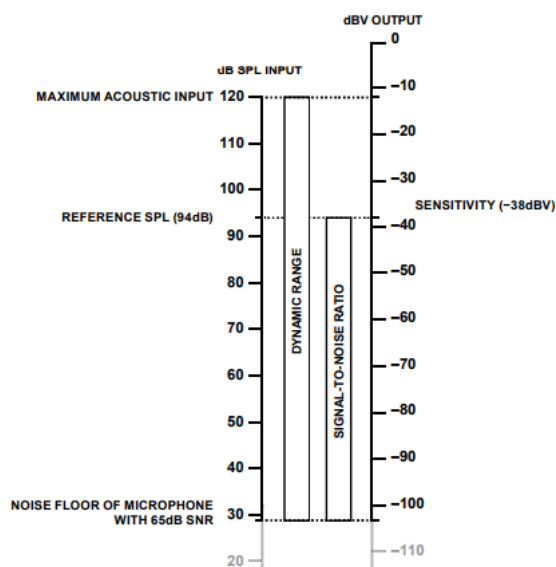
Kde M_R je referenční hodnota 1 V/Pa.

Pro digitální mikrofony se citlivost vyjadřuje jako dBFS (Decibels relative to full scale). Citlivost je zde vyjádřena jako velikost přijímaného signálu při 1 kHz v poměru ku maximálnímu signálu.

Porovnání dBFS a dBV můžeme vidět na následujícím obrázku.



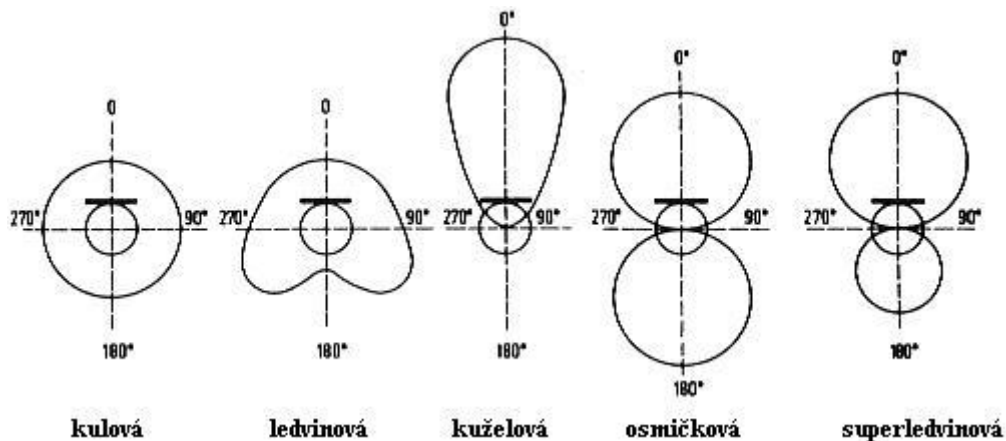
Obr. 20: Citlivost digitálního mikrofonu [9]



Obr. 19: Citlivost analogového mikrofonu [9]

4.2 Směrová charakteristika

Směrová charakteristika udává odchylku odezvy citlivosti vzhledem k směru příchodu zvuku. Je to závislost citlivosti mikrofonu na úhlu, který svírá akustická osa mikrofonu s osou akustického zdroje. Existují různé typy směrových charakteristik. Nejčastějšími jsou kulové (omnidirectional), ledvinové (cardioid), kuželové, osmičkové (bidirectional) a superledvinové (supercardioid). U MEMS mikrofonů se nejčastěji setkáváme s kulovými směrovými charakteristikami. [10]



Obr. 21: Typy směrových charakteristik [10]

4.3 Napájecí napětí, spotřeba

Pokud budeme vycházet z datasheetu mikrofonů z tabulky (příloha) tak se napájecí napětí pohybuje v rozmezí 0–4 V. Pracovní napětí je v rozmezí 1.5–3.6 V. Kdy nejčastěji se vyskytující hodnota je 1.5–3.6 V.

U digitálních a analogových výstupů se napájecí napětí nijak výrazně neliší.

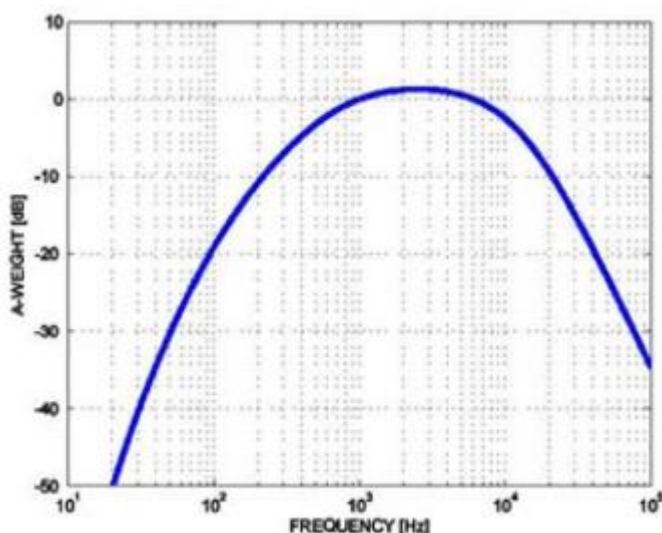
Odběr MEMS mikrofonů dle typu výstupu (analog, digitál). U analogových mikrofonů je průměrný maximální odběr 140 μA . U digitálních mikrofonů je průměrný maximální odběr 550 μA , kdy u ultrazvukových mikrofonů (digitální) dosahuje odběr až 1000 μA .

5 DYNAMICKÉ PARAMETRY MEMS MIKROFONŮ

5.1 SNR

SNR (Signal-to-Noise ratio) určuje poměr mezi daným referenčním signálem a množstvím zbytkového šumu na výstupu mikrofonu. Referenční signál je standardní signál mikrofonového výstupu při tlaku 1 Pa a frekvenci 1kHz. Signál šumu je signál na výstupu mikrofonu při nulovém vstupním signálu (žádný vnější akustický zásah).

Tento parametr zahrnuje šum jak MEMS mikrofonu, tak šum ASICu. Šum MEMS senzoru je však mnohonásobně větší, proto lze šum integrovaného obvodu zanedbat. Typicky se velikost šumu měří ve speciálně odhlučněné místnosti pomocí frekvenční odezvy na A váhovaný filtr, který má podobný frekvenční rozsah jako lidské ucho. [9]



Obr. 22: Odezva A-váhovaného filtru na frekvenci [9]

5.2 Dynamický rozsah

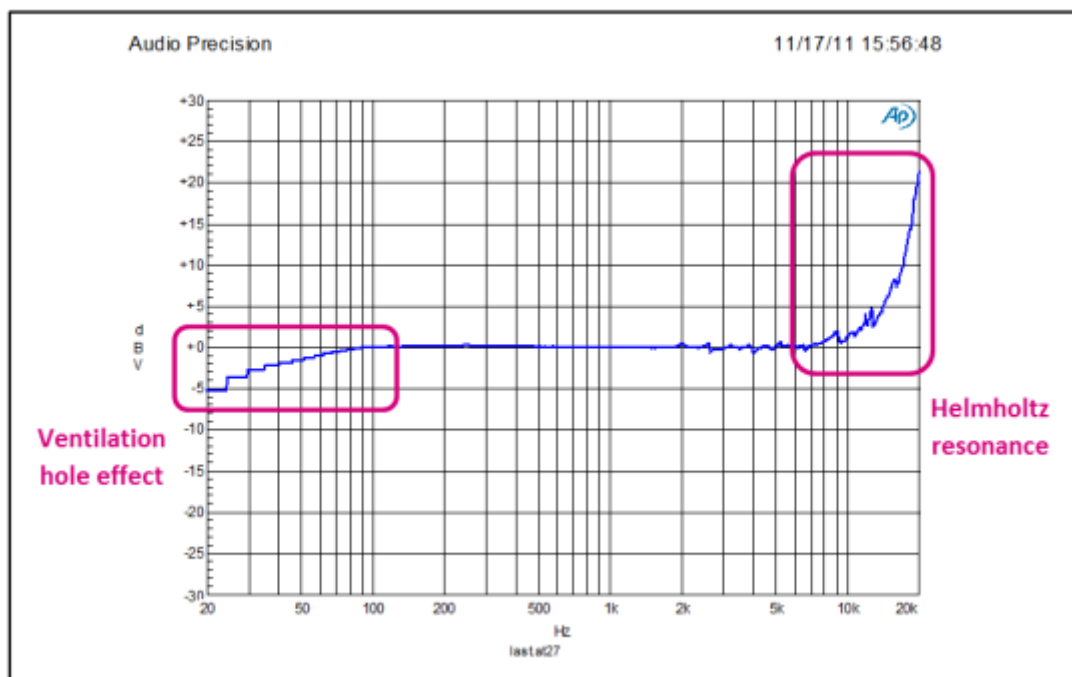
Dynamický rozsah je rozdíl mezi minimálním a maximálním signálem, který je mikrofon schopný generovat na výstupu.

- Minimální signál je nejmenší signál, který mikrofon dokáže generovat zřetelně od šumu. Jinak řečeno se minimální signál rovná zbytkovému šumu mikrofonu.
- Maximální signál je takový, který mikrofon dokáže generovat bez zkreslení. Označuje se jako AOP (Acoustic-Overload-Point) neboli maximální hodnota akustického tlaku. [9]

5.3 Kmitočtová charakteristika

Kmitočtová charakteristika určuje rozsah přenášeného pásma akustických signálů. Jedná se o závislost výstupního napětí mikrofonu na frekvenci (při konstantním akustickém tlaku). Pro kvalitní záznam zvuku (slyšitelného) se požaduje rovnoměrná charakteristika v rozsahu od 40 Hz do 15 kHz. Nerovnoměrnost (zvlnění) kmitočtové charakteristiky by nemělo v tomto pásmu přesáhnout ± 5 dB.

Kmitočtová charakteristika závisí na třech parametrech mikrofonu. Na ventilačním otvoru, geometrii zadní komory a přední komory. Ventilační otvor a geometrie zadní komory mají vliv na průběh charakteristiky při nízkých kmitočtech, zatímco průběh vysokých kmitočtů závisí na geometrii přední komory. U vysokých kmitočtů se může charakteristika dostat do stavu Helmholtzovy rezonance. Tato rezonance je způsobena vzdušnou rezonancí v dutině a závisí na velikosti přední komory mikrofonu. Na Obrázku č. 11 můžeme vidět kmitočtovou charakteristiku mikrofonu MP45DT02-M. Při 18 kHz nastává Helmholtzova rezonance způsobená velkou přední komorou tohoto mikrofonu. [9] [10]



Obr. 23: MP45DT02-M frekvenční odezva [9]

6 KALIBRAČNÍ METODY

Kalibrace se provádí z důvodu stanovení skutečné citlivosti měřícího mikrofону. Základní kalibrační metodou je kalibrace v uzavřené dutině. Kalibrace však lze také provádět v poli stojaté vlny, ve volném poli nebo v difuzním poli. Při kalibraci ve volném poli nebo difuzním poli je dále potřeba provést korekci s ohledem na ohyby vln na mikrofónu, vznikající při frekvencích, kdy je délka vlny srovnatelná s průměrem mikrofónu. [16] [17]

6.1 Metoda reciprocity

Jedná se o nejpřesnější kalibrační metodu pro zjištění citlivosti otevřeného obvodu mikrofónu. Citlivost se zjišťuje jako tlaková nebo ve volném poli. Metoda reciprocity je absolutní, z čehož vyplývá, že je potřeba měřit několik základních fyzikálních veličin, jako například elektrické napětí, impedanci, teplotu, vlhkost a okolní tlak. Metoda určuje současně citlivost tří mikrofónů, z čehož nejméně dva musí být reciproční, to znamená, že mohou být používány jako přijímače (mikrofony), tak jako vysílače (zvukové zdroje).

Pro úplné dokončení kalibrace je zapotřebí, aby se měření třikrát opakovalo po záměně mikrofónů (tři mikrofony, tři polohy). Výsledky těchto tří měření se následně využijí v řešení tří rovnic o třech neznámých. Pro zajištění přesných výsledků, je potřeba co nejstabilnější prostředí. [16]

6.2 Metoda pistonfonu

Kalibrační metoda pomocí pistonfonu využívá jednoduchého principu, a to vztahu mezi výchylkou pohyblivého pístu a akustickým tlakem v uzavřené komoře. Takováto metoda kalibrace je absolutní. Akustický tlak se odvozuje od základních fyzikálních veličin (rozměry, výchylky, tlak). [16]

Method	Uncertainty
Reciprocity Calibration	0.03 to 0.05 dB
Comparison Method	0.06 to 0.14 dB
Substitution Method	0.06 to 0.14 dB
Pistonphone Sound Level Calibrator	0.07 to 0.3 dB
Actuator Frequency Response	0.1 to 0.5 dB

Tab. 2: Nejistoty jednotlivých kalibračních metod [16]

6.3 Srovnávací metoda ve volném poli [17]

Srovnávací metoda je založena na přímém porovnání testovacího mikrofonu s mikrofonem referenčním. Kalibrační metoda srovnávání ve volném poli, je založena na vystavení kalibrovaného referenčního mikrofonu a testovacího mikrofonu stejnému akustickému tlaku ve volném poli. Principiálně, je poměr citlivostí proporcionální poměru naměřeného výstupního napětí. Tudíž je možné určit citlivost ve volném poli testovacího mikrofonu z citlivosti referenčního mikrofonu. Poměr výstupního napětí může být měřen dvěma způsoby, a to postupně nebo zároveň. Každá z těchto dvou metod představuje soubor různých požadavků na zdroj zvuku vytvářející akustický tlak. Například postupná metoda vyžaduje, aby zvukové pole mělo dobrou stabilitu. Souběžná metoda toto nevyžaduje, avšak je u současné metodu potřeba, aby akustický tlak byl stejný u umístěných mikrofonů.



Obr. 24: Srovnávací metoda, vlevo postupná, vpravo současná [17]

6.3.1 Metodika kalibrace

Kalibrace mikrofonů porovnáváním je založena na předpokladu, že testovací mikrofon (TM) je vystaven stejnému akustickému poli jako referenční mikrofon (RM). Po splnění tohoto předpokladu, je citlivost TM, M_{TM} , výsledkem vynásobení poměru výstupního napětí otevřeného obvodu TM, U_{TM} , a R_M , U_{RM} , RM a citlivostí ve volném poli referenčního mikrofonu, M_{RM} (v následujícím textu, kdykoliv je zmíněno výstupní napětí, jedná se o výstupní napětí otevřeného obvodu).

$$\begin{aligned} M_{TM} &= M_{RM} \cdot R_M \\ R_M &= \frac{U_{TM}}{U_{RM}} \end{aligned} \quad (2)$$

Citlivost ve volném poli referenčního mikrofonu je známá předem a poměr výstupních napětí může být odvozen z měření ve volném poli. Výstupní napětí je přímo úměrný citlivosti ve volném poli každého mikrofonu. Úroveň citlivosti testovacího mikrofonu ve volném poli při 1 V/Pa, L_{TM} , lze určit stejným způsobem.

$$\begin{aligned} L_{TM} &= L_{RM} + \Delta_M, \\ \Delta_M &= 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{|U_{TM}|}{|U_{RM}|} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Citlivost ve volném poli je definována jako poměr výstupního napětí otevřeného obvodu k akustickému tlaku, který by vznikl na pozici akustického středu mikrofonu v nepřítomnosti mikrofonu. To značí, že poměr napětí otevřeného obvodu v rovnici (2) závisí na rozdílu pozic akustických středů testovacího mikrofonu a referenčního mikrofonu. Dále, při praktické realizaci volného pole v bezodrazové místnosti, rozdílné pozice akustických středů mohou ovlivňovat, jak odrazy stěn trefují mikrofony.

Změny týkající se prostředí různě ovlivňují citlivost typů mikrofonů. Jelikož je však citlivost testovacího mikrofonu vypočtena při měřících podmínkách a citlivost referenčního mikrofonu bude dána referenčními podmínkami, je nutno aplikovat faktor na citlivost referenčního mikrofonu. Tento faktor se vypočte jako:

$$R_{Env} = 10^{(\delta_p(p_s - p_0) + \delta_t(t - t_0) + \delta_d(t - t_0))/20}, \quad (4)$$

Kde δ_p je statický tlakový koeficient v dB/kPa, δ_t je teplotní koeficient v dB/K, δ_d je difrakční koeficient v dB/K, p_s a t jsou statický tlak a teplota při měřících podmínkách, a p_0 a t_0 jsou referenční statický tlak a teplota. Tudiž lze vypočítat citlivost testovacího mikrofonu ve volném poli v dB pomocí následujícího vzorce:

$$\begin{aligned} L_{DUT} &= (L_{REF} + \Delta_{Env}) + \Delta_M, \\ \Delta_{Env} &= 20 \cdot \log_{10}(R_{Env}). \end{aligned} \quad (5)$$

Následné zpřesnění by bylo možné dosáhnout pomocí porovnávání testovacího mikrofonu s více než jedním referenčním mikrofonem. Odstranily by se tím pádem nepřesnosti způsobené náhodnými změnami prostředí, jenž vznikají při měření. To také slouží jako kontrola reprodukovatelnosti měření.

6.3.2 Postupná kalibrace

Platnost rovnic (2) a (3) u postupné kalibrace může být posuzováno definováním, že průměrné výstupní napětí testovacího mikrofonu a referenčního mikrofonu je zjištěné při měření na různých periodách τ_{TM} a τ_{RM} . Usoudíme-li tedy, že testovací mikrofon a referenční jsou měřeny ve stejné pozici, výstupní napětí je:

$$\begin{aligned}U_{RM} &= M_{RM} \cdot p_{\tau_{RM}}, \\U_{TM} &= M_{TM} \cdot p_{\tau_{TM}},\end{aligned}\tag{6}$$

kde $p_{\tau_{TM}}$ a $p_{\tau_{RM}}$ je akustický tlak přítomný při měření period pro referenční a testovací mikrofon. Z toho vyplývá, že poměr napětí bude:

$$R_M = \frac{U_{TM}}{U_{RM}} = \frac{M_{TM}}{M_{RM}} \cdot \frac{p_{\tau_{TM}}}{p_{\tau_{RM}}} = \frac{M_{TM}}{M_{RM}} \cdot F_{TIME},\tag{7}$$

kde F_{TIME} je faktor časové stability, jenž souvisí se zdrojem zvuku. Z důvodu principů, na jakých většina zdrojů pracuje, tato hodnota nemůže být zanedbána. Mimoto, faktor časové stability může být odhadnut pomocí opakovaného měření výstupního napětí testovacího mikrofonu.

6.3.3 Souběžná kalibrace

Pokud u souběžné kalibrace měříme výstupní napětí referenčního a testovacího mikrofону ve stejnou chvíli, nemusíme uvažovat časovou stabilitu zdroje zvuku. Je ovšem nutné, aby akustický tlak generovaný zdrojem byl naprosto stejný u obou mikrofónů. Tím pádem je kladen vysoký důraz na směrovost zdroje zvuku, kdy by se akustický tlak generován tímto zdrojem neměl v určitém rozsahu měnit, nicméně i malé nedokonalosti mohou vést k nerovným zvukovým polím. Z tohoto důvodu je výstupní napětí referenčního a testovacího mikrofónu vždy lehce ovlivněno nedokonalostí zvukového pole:

$$\begin{aligned} U_{RM} &= M_{RM} \cdot p_{ORM}, \\ U_{TM} &= M_{TM} \cdot p_{OTM}, \end{aligned} \quad (8)$$

kde p_{ORM} a p_{OTM} jsou akustické tlaky na pozicích jednotlivých mikrofónů. Z toho lze odvodit, že napěťový poměr bude:

$$R_M = \frac{U_{TM}}{U_{RM}} = \frac{M_{TM}}{M_{RM}} \cdot \frac{p_{OTM}}{p_{ORM}} = \frac{M_{TM}}{M_{RM}} \cdot F_{POSITION}, \quad (9)$$

kde $F_{POSITION}$ je faktor prostorové jednotvárnosti související se zdrojem zvuku. Oproti faktoru časové stability, je možné, jej eliminovat pomocí výměny pozic mikrofónů. Je možné bezpečně předpokládat, že směrová funkce bude stabilní při různých měřících okamžicích. Následně výstupní napětí definujeme jako:

$$R'_M = \frac{U_{TM}}{U_{RM}} = \frac{M_{TM}}{M_{RM}} \cdot \frac{p_{ORM}}{p_{OTM}} = \frac{M_{TM}}{M_{RM}} \cdot \frac{1}{F_{POSITION}}. \quad (10)$$

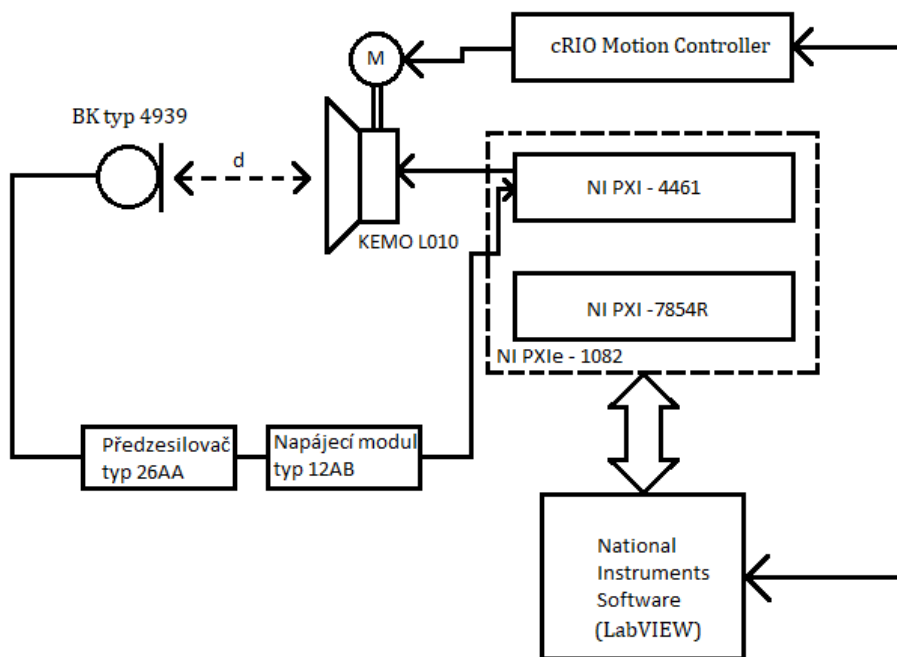
Vypočtením R_M a R'_M získáme poměr napětí bez faktoru prostorové jednotvárnosti:

$$R''_M = R_M \cdot R'_M = \left(\frac{M_{TM}}{M_{RM}} \right)^2. \quad (11)$$

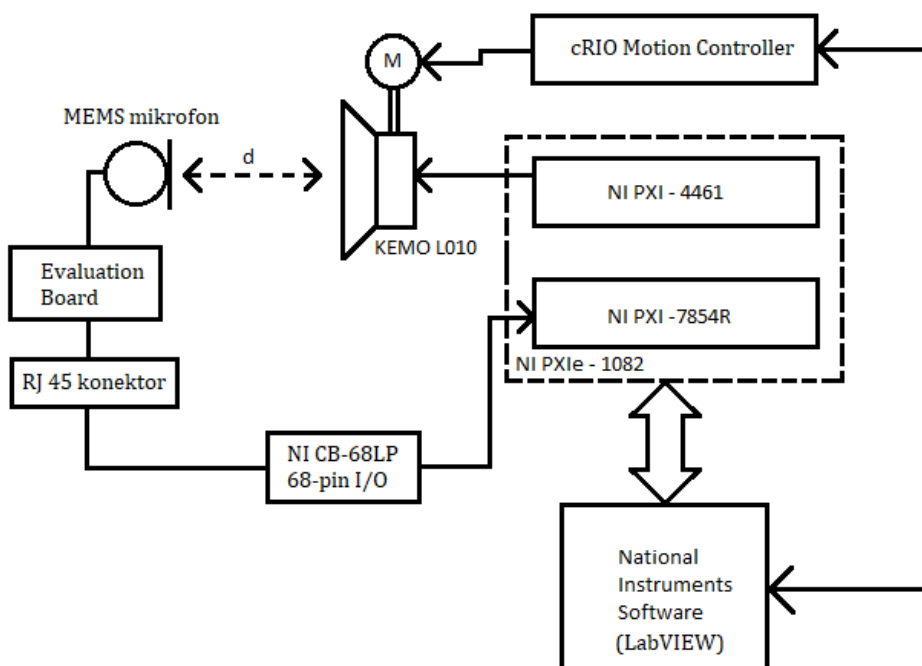
Díky této záměně, je souběžná kalibrace imunní vůči časové nestabilitě zdroje.

7 MĚŘÍCÍ PRACOVISTĚ

Pro experiment bylo potřeba navrhnout dvě měřicí pracoviště. Jedno pro měření s referenčním mikrofonom, další pro měření s MEMS mikrofony. Veškeré využité komponenty jsou popsány dále.



Obr. 25: Schéma měřicího pracoviště č. 1 pro ověření parametrů reproduktoru



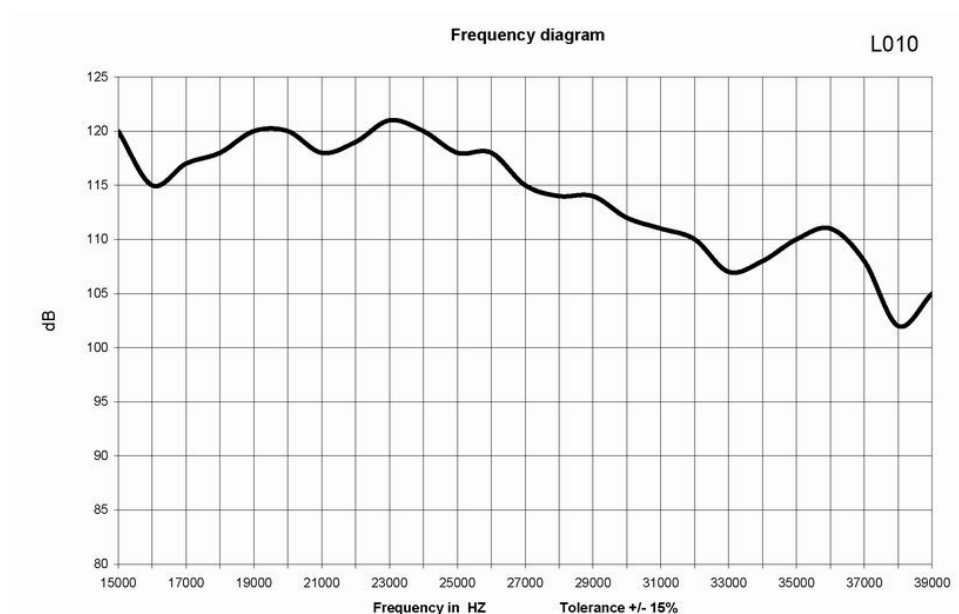
Obr. 26: Schéma měřicího pracoviště č. 2 pro měření MEMS mikrofónů

7.1 Reproduktor

Jako akustický zdroj byl zvolen KEMO L010 z důvodu širokého frekvenčního rozsahu a nízké pořizovací ceny.



Obr. 27: KEMO L010 [22]



Obr. 28: Frekvenční charakteristika KEMO L010 udávána výrobcem [22]

Jmenovité napětí	16 V
Frekvenční rozsah	2–60 kHz
Hladina akustického tlaku	Max. 120 dB ($\pm 15\%$)
Teplotní rozsah	-25 až +80 °C
Úhel vyzařování	160°

Tab. 3: Vlastnosti reproduktoru KEMO L010

7.2 Referenční mikrofon Brüel & Kjær Type 4939

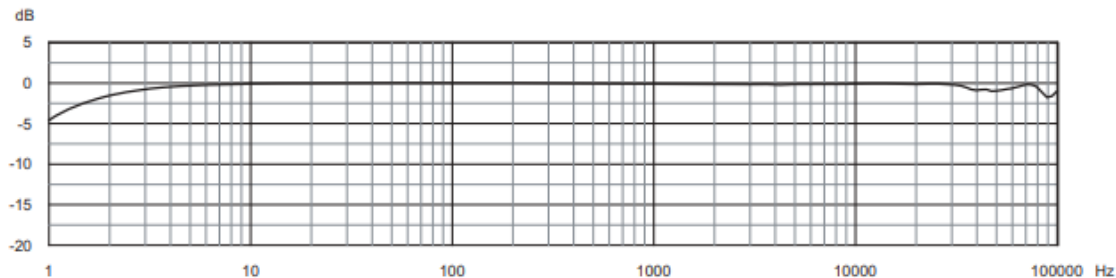
BK typ 4939 je 1/4" mikrofon určený pro měření ve volném poli. Byl použit jako referenční mikrofon. Při výběru tohoto mikrofonu byl kladen požadavek na stabilitu a stálou citlivost do co nejvyšších kmitočtů. Při měření je předpokládáno, že směrová charakteristika tohoto mikrofonu je kulová.



Obr. 29: Mikrofon BK type 4939 [21]

Citlivost	4 mV/Pa
Frekvence	4 Hz – 100 kHz
Dynamický rozsah	28–164 dB
Teplotní rozsah	-40 až +150 °C
Polarizační napětí	200 V externí

Tab. 4: Vlastnosti BK Type 4939 [21]



Obr. 30: BK type 4939 frekvenční charakteristika [21]

7.3 Předzesilovač G.R.A.S. Type 26AA

Předzesilovač pro 1/4“ kondenzátorové mikrofony. Tento předzesilovač lze využít v širokém rozsahu kmitočtů (2,5 Hz – 200 kHz). Jako výstup využívá 4-pin LEMO konektor. [19]



Obr. 31: G.R.A.S. type 26AA předzesilovač [19]

7.4 Zdroj G.R.A.S. 12AB

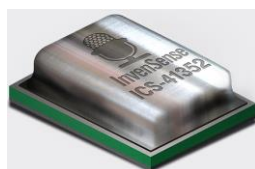
Jako napěťový zdroj pro měření s referenčním mikrofonom byl zvolen dvoukanálový zdroj G.R.A.S. 12AB.



Obr. 32: G.R.A.S. 12AB [26]

7.5 Mikrofon ICS-41352

Jako měřený mikrofon byl zvolen digitální MEMS mikrofon ICS-41352 od společnosti InvenSense, z důvodu velkého rozsahu kmitočtu (až 85 kHz) a možnosti zakoupení testovacího kitu (zapájený mikrofon na flex desce).



Obr. 33: Mikrofon ICS-41352 [18]

Rozměr	3,50 x 2,65 x 0,98
Port	Spodní
Citlivost	-26 +/-1 dBFS
Maximální akustický tlak	120 dB SPL
Odstup signál – šum	64 dBA
Frekvenční rozsah	100 Hz – 85 kHz
Maximální odběr	500 uA
Typ signálu	PDM

Tab. 5: Vlastnosti ICS-41352 [18]

7.6 Mikrofon SPH0641LU4H-1

Jako další měřený MEMS mikrofon byl zvolen SPH0641LU4H-1 od společnosti Knowles, který má také široký frekvenční rozsah až 80 kHz.

Rozměr	3,50 x 2,65 x 0,98
Port	Spodní
Citlivost	-26 +/-1 dBFS
Maximální akustický tlak	120 dB SPL
Odstup signál – šum	64 dBA
Frekvenční rozsah	100 Hz – 80 kHz
Maximální odběr	700 uA
Typ signálu	PDM

Tab. 6: Vlastnosti SPH0641LU4H-1 [23]

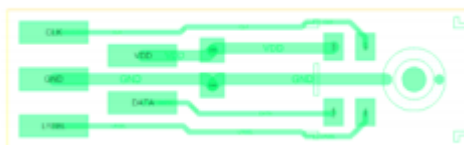
7.7 Flex evaluation board

Jedná se o malou jednoduchou destičku s již připájeným MEMS mikrofonom, která umožňuje rychlé vyhodnocení vlastností tohoto mikrofону. Skládá se z dolního portu mikrofónu připájeného na flexibilní plošku s připojenými kabely. Jediná další součást je kondenzátor s kapacitou 0,1 uF. [20]

Evaluation board byl zakoupen s již připájeným modelem ICS-41352. Pro model SPH0641LU4H-1 byl použit tentýž evaluation board. Bylo ovšem nutno odpájet model ICS a nahradit jej SPH.



Obr. 34: Evaluation board [20]



Obr. 35: Evaluation board layout [20]

7.8 Software v LabVIEW

Software, pomocí kterého bylo měření prováděno, byl převzat a náležitě upraven, z důvodu kalibrací, pro potřeby navrženého experimentu. Software je navržen pro karty NI PXI – 4461 a NI PXI – 7854R. Dále byl použit software pro ovládání cRIO Motion Controller, jenž umožňuje nastavení úhlu natočení a lineární vzdálenosti mezi měřeným objektem a zdrojem zvuku.

7.9 NI PXIe – 1082

Jedná se o šasi pro připojení I/O karet. Akceptuje moduly PXI express v každém slotu a podporuje také standard PXI hybrid, kompatibilní až pro čtyři sloty. [24] Všechny karty byly při měření zapojeny do tohoto modulu.

7.10 Karta NI PXI – 4461

Jedná se o vysokorychlostní kartu určenou na měření zvuku a vibrací. Disponuje dvěma analogovými kanály pro generování dynamického signálu a dvěma analogovými kanály vstupními. Software a hardware této karty zajišťuje vysokou přesnost při měření s mikrofony. [24]

Jeden výstupní port karty byl přímo připojen k reproduktoru a byl využíván jako jeho napájecí zdroj. Vstupní port karty byl využit pro měření s referenčním mikrofonom Brüel & Kjær Type 4939, kdy do něj byl zapojen předzesilovač G.R.A.S. Type 26AA.

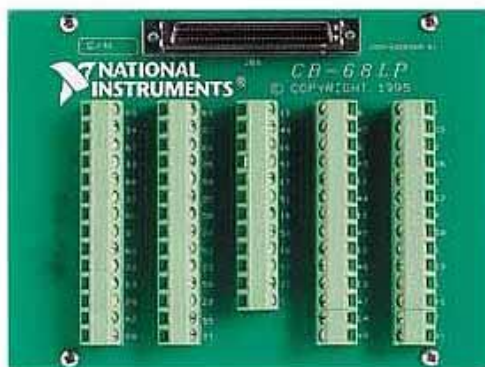
7.11 Karta NI PXI – 7854R

Tato karta nabízí uživatelsky programovatelnou FPGA pro vysoce výkonné zpracování dat a přímou kontrolu nad I/O signály. [24]

Pomocí této karty bylo možné zpracovávat digitální PDM signál z MEMS mikrofونů. Tento signál byl přiváděn z konektorového bloku NI CB-68LP pomocí 68 pinového konektoru.

7.12 Konektorový blok NI CB-68LP

Konektorový blok byl využíván pro připojení konektorů z evaluation board ke kartě NI PXI – 7854R.



Obr. 36: NIC CB-68LP [24]

8 MĚŘENÍ

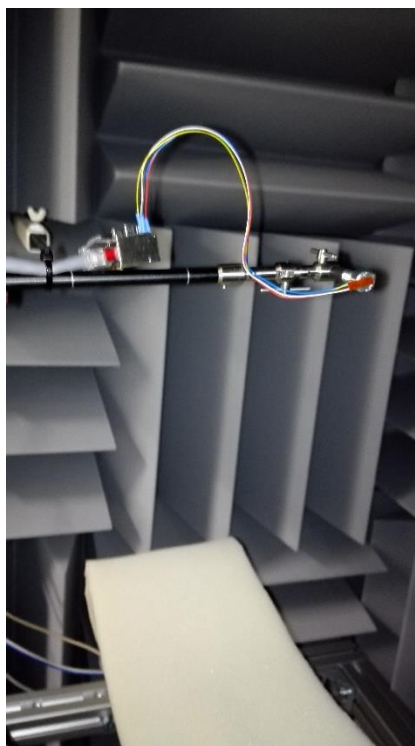
Měřicí pracoviště pro referenční mikrofon bylo zapojeno dle schémat na straně 25. Po zapojení a odzkoušení, proběhlo měření ve dvou fázích. Nejdříve byl nakalibrován referenční mikrofon BK type 4939. Pomocí tohoto mikrofonu bylo možné změřit frekvenční a směrovou charakteristiku zdroje zvuku (KEMO L010). Následně byly s využitím metody srovnávací postupné kalibrace ve volném poli nakalibrovány MEMS mikrofony a změřeny jejich frekvenční charakteristiky citlivosti. Aby se co nejlépe mikrofony vyměňovaly, byl využit konektor RJ45, s vyměnitelnou částí, jenž byla připájena ke kontaktům evaluation board samotného mikrofonu.

8.1 Reálné zapojení měřícího pracoviště



Obr. 37: Reálné zapojení pracoviště pro měření s MEMS mikrofony

8.2 Připojení MEMS mikrofonu



Obr. 38: Připojení MEMS mikrofonu

8.3 Kalibrace kalibrátorem G.R.A.S. 42AP

Tento kalibrátor byl využit pro kalibraci referenčního mikrofonu Brüel & Kjær Type 4939. Kalibračním prvkem je pistonfon a zobrazovaný akustický tlak je již po korekci na okolní teplotu a barometrický tlak. Kalibrace proběhla na frekvenci 250 Hz při akustickém tlaku 113,77 dB. Převodní konstanta pro přepočet výstupního napětí z mikrofonu na akustický tlak byla nastavena tak, aby akustický tlak měřený sestaveným měřícím řetězcem a zobrazený v aplikaci vytvořené v prostředí LabVIEW odpovídal hodnotě indikované pistonfonem.

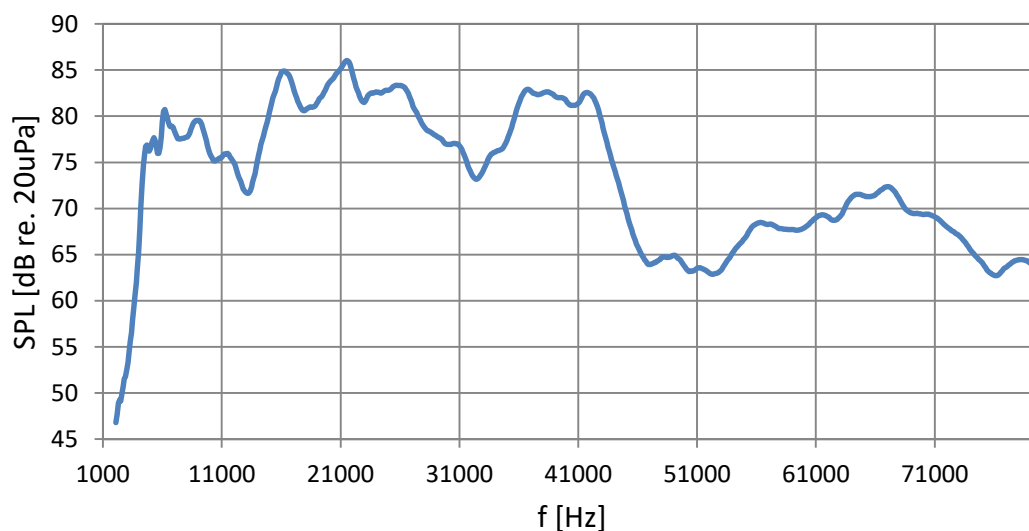


Obr. 39: Kalibrátor 42AP [25]

8.4 KEMO L010

Naměřená frekvenční charakteristika reproduktoru KEMO L010 pomocí referenčního mikrofону.

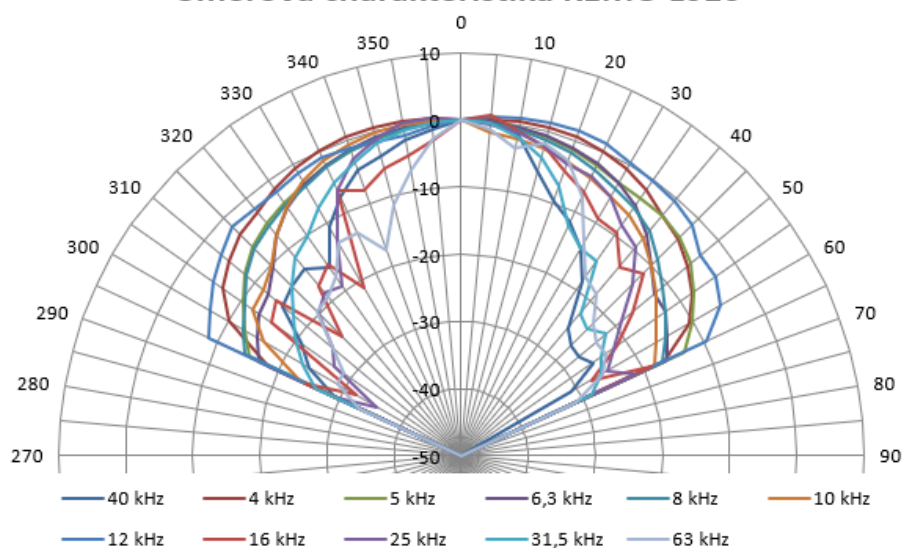
Frekvenční charakteristika KEMO L010



Obr. 40: Naměřená frekvenční charakteristika KEMO L010

Měření bylo opakováno pro úhly natočení -65° až 65° . Z takto získaných dat bylo možné získat směrovou charakteristiku reproduktoru, kdy na svislé ose je citlivost mikrofónu v dB, kdy 0 dB odpovídá generovanému akustickému tlaku 1 Pa ve vzdálenosti 1 m a při vstupním elektrickém napětí 1Vp.

Směrová charakteristika KEMO L010

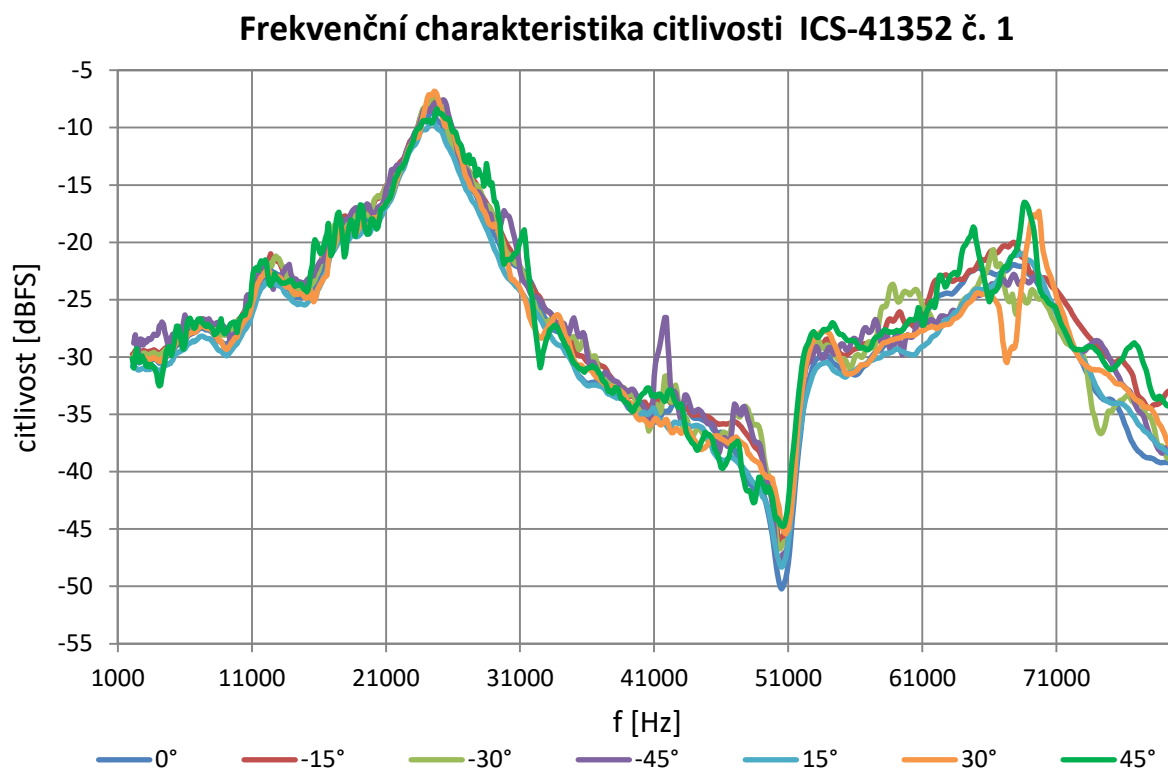


Obr. 41: Směrová charakteristika KEMO L010

8.5 ICS – 41352

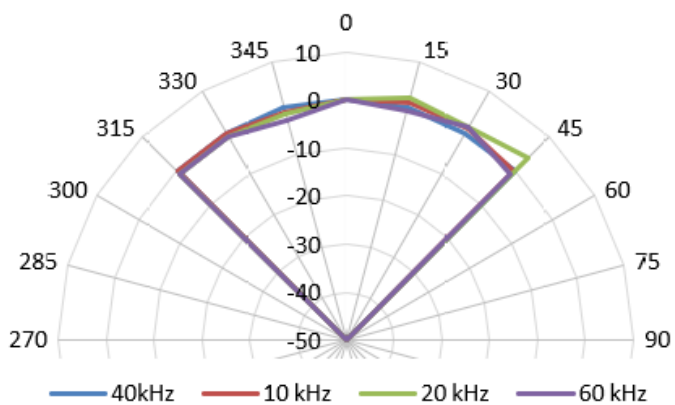
Naměřené charakteristiky pro mikrofon ICS-41352 č. 1.

Frekvenční charakteristika citlivosti byla změřena pro úhlové natočení -45° až 45° .



Obr. 42: Citlivost ICS-41352 mikrofon č. 1

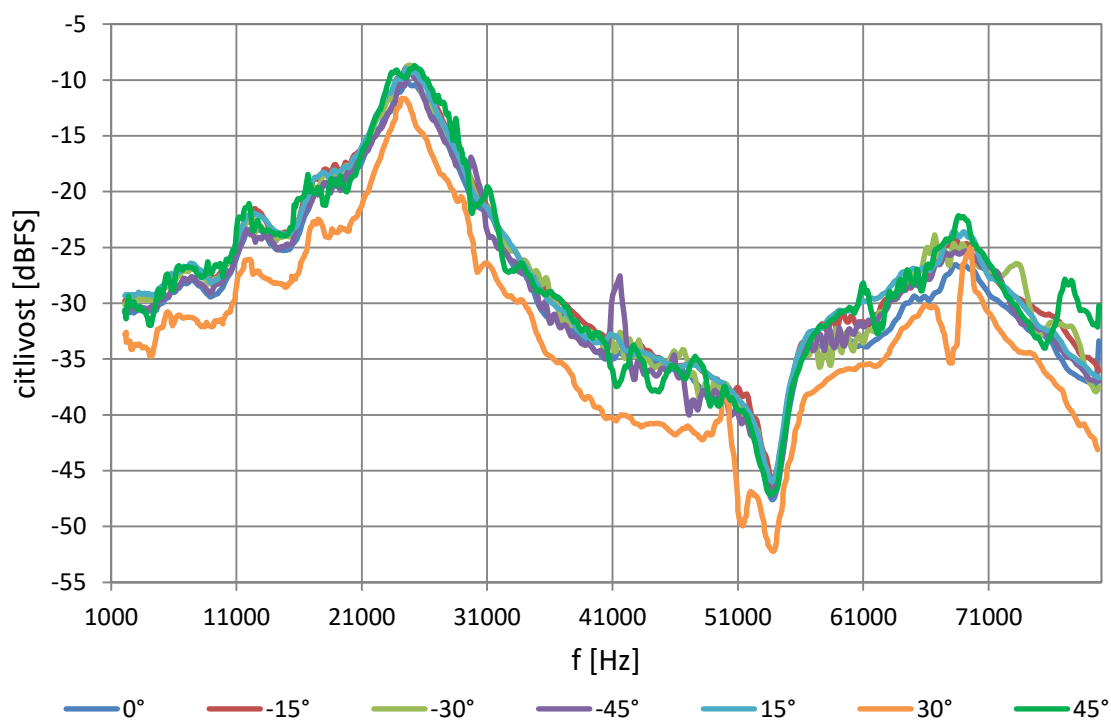
Směrová charakteristika ICS-41352 mikrofon č. 1



Obr. 43: Směrová charakteristika ICS-41352 č. 1

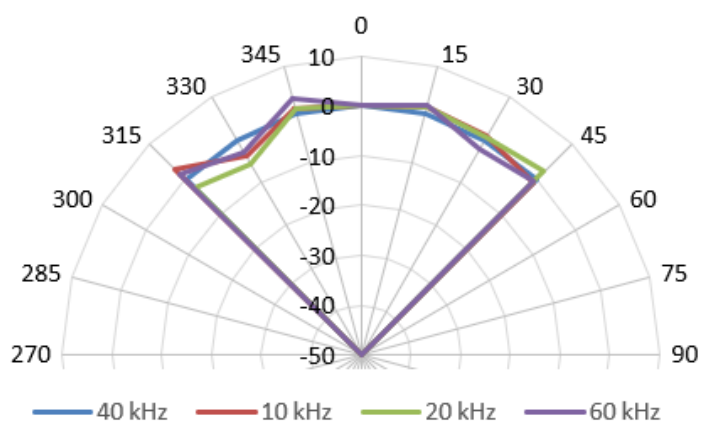
Naměřené charakteristiky pro mikrofon ICS-41352 č. 2

Frekvenční charakteristika citlivosti ICS-41352 č. 2



Obr. 44: Citlivost ICS-41352 mikrofon č. 2

Směrová charakteristika ICS-41352 mikrofon č. 2

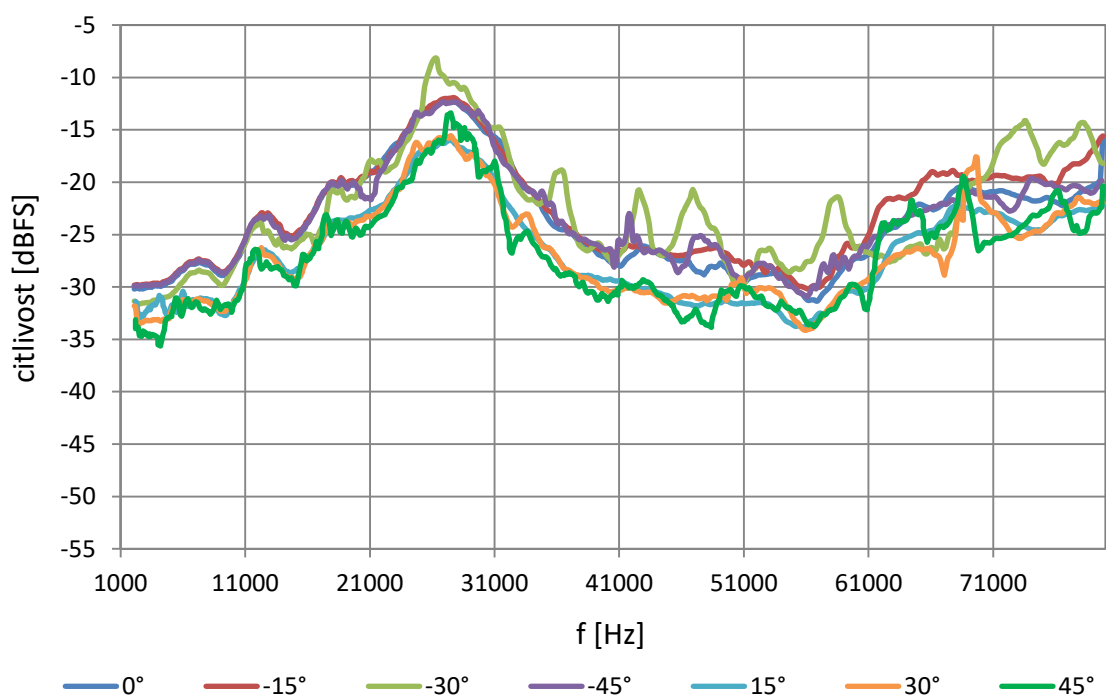


Obr. 45: Směrová charakteristika ICS-41352 č. 2

8.6 SPH0641LU4H-1

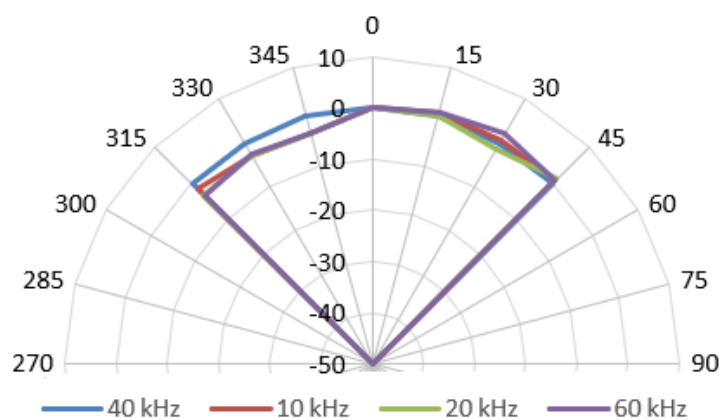
Naměřené charakteristiky mikrofonu SPH0641LU4H-1.

Frekvenční charakteristika citlivosti SPH0641LU4H-1



Obr. 46: Frekvenční charakteristika citlivosti SPH0641LU4H-1

Směrová charakteristika SPH0641LU4H-1



Obr. 47: Směrová charakteristika SPH0641LU4H-1

9 ZÁVĚR

Dle zadání práce jsem zpracoval literární průzkum na téma MEMS mikrofonů. Typy aktuálně využívaných MEMS mikrofonů, jejich výrobci a parametry jsou shrnuty v příloze č. 2 Tabulka MEMS mikrofonů.

Na základě možností laboratoře bylo navrženo měřící pracoviště. Pro dosažení co nejpřesnějších výsledků, byla využita bezodrazová komora. Veškerá měření probíhala v širokém kmitočtovém rozsahu, a to až do 80 kHz. Před samotným měřením MEMS mikrofonů, byl nakalibrován referenční mikrofon a změřeny charakteristiky reproduktoru KEMO L010. Na základě těchto charakteristik, s využitím postupné srovnávací metody ve volném poli, bylo následně možné změřit frekvenční charakteristiky citlivosti a směrové charakteristiky mikrofonu SPH0641LU4H-1 a dvou mikrofonů ICS-41352. Naměřené charakteristiky odpovídají údajům výrobce. Z konstrukčních důvodů nebylo možné proměřit celé směrové charakteristiky mikrofonů, ale z naměřených dat lze předpokládat, že se jedná o charakteristiky kulové, tak jak udávají výrobci.

Literatura

- [1] *Elektroakustika* [online]. [cit. 2017-12-08]. Konstrukce mikrofonů.
Dostupné z: http://www.elektroakustika.cz/types_microphones.html
- [2] HUSÁK, Miroslav. *Užití MEMS v průmyslu* [online]. [cit. 2017-12-08]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/38277.pdf>
- [3] SRINIVASULU, Ashok Kumar a Hari PRASAD. Embedded MEMS: A New Era in Mobile Technology. *International Journal of Engineering Research and Applications* [online]. [cit. 2017-12-08]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/282336947_fig5_Figure-7-Internal-structure-of-MEMS-microphone-From-the-Fig7-the-change-in-capacitance
- [4] Revenue Growth Sounding Strong for Suppliers of Packaged MEMS Microphones. *BusinessWire* [online]. [cit. 2017-12-08]. Dostupné z: <http://www.businesswire.com/news/home/20161018006400/en/Revenue-Growth-Sounding-Strong-Suppliers-Packaged-MEMS>
- [5] KITE, Thomas. *Understanding PDM Digital Audio* [online]., 9 [cit. 2017-12-08]. Dostupné z: http://users.ece.utexas.edu/~bevans/courses/rtdsp/lectures/10_Data_Conversion/AP_Understanding_PDM_Digital_Audio.pdf
- [6] HANÁK, Pavel a Kamil VRBA. *A/D převodníky (kapitola sigma-delta)*. Brno, 2017. Vysoké učení technické v Brně.
- [7] *I2S bus specification* [online]. [cit. 2017-12-09]. Dostupné z: https://web.archive.org/web/20070102004400/http://www.nxp.com/acrobat_download/various/I2SBUS.pdf
- [8] *ICS-52000: TDM Data interface* [online]. 20 [cit. 2017-12-09]. Dostupné z: <http://www.invensense.com/wp-content/uploads/2016/05/DS-000121-ICS-52000-v1.3.pdf>
- [9] *Tutorial for MEMS microphones: Acoustic parameters* [online]. In: STMicroelectronics, s. 20 [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/46/0b/3e/74/cf/fb/4b/13/DM00103199.pdf/files/DM00103199.pdf/jcr:content/translations/en.DM00103199.pdf
- [10] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. *Encyklopedie fyziky: Základní vlastnosti mikrofonů* [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/375-elektroakustika>
- [11] Sengpielaudio. *Sengpielaudio* [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <http://www.sengpielaudio.com/calculator-transferfactor.htm>
- [12] JIŘÍ, Háze. *Teorie vzájemného převodu analogového a číslicového signálu* [online]. In: 2010 [cit. 2018-01-07]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/13693096-Teorie-vzajemneho-prevodu-analogoveho-a-cislicoveho-signalu.html>
- [13] NOVOTNÝ, Jan. *Úvod do číslicového zpracování signálů* [online]. In: 2001 [cit. 2018-01-07]. Dostupné z: <http://noel.feld.cvut.cz/vyu/ucz/cv4/>

- [14] JOHNSON, Colin. *MEMS Microphone Market Expected to Hit \$1B in 2017* [online]. In: 2017 [cit. 2018-01-09]. Dostupné z: https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1331913
- [15] NOVOTNÝ, Jan. *Úvod do číslicového zpracování signálů: Ukázka decimace* [online]. In: 2001 [cit. 2018-01-09]. Dostupné z: <http://noel.feld.cvut.cz/vyu/ucz/cv9/index.htm>
- [16] BRÜEL & KJÆR. *Microphone Handbook* [online]. In: 1996. s. 155 [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <https://www.bksv.com/media/doc/be1447.pdf>
- [17] Barrera Figueroa, S., Torras Rosell, A., Rasmussen, K., Jacobsen, F., & Henriquez, V. C. (2012). A practical implementation of microphone free-field comparison calibration according to the standard IEC 61094-8. In INTER-NOISE 2012 Proceedings Acoustical Society of America.
- [18] *ICS-41352* [online]. 2016, 22 [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2016/10/DS-000048-ICS-41352-data-sheet-v1.0.pdf>
- [19] *¼" Preamplifier Type 26AA* [online]. 2 [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: https://www.gras.dk/files/p/d/pd_26aa_cs4_04022010.pdf
- [20] *MEMS Microphone Flex Evaluation Board User Guide* [online]. 4 [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <https://www.mouser.com/ds/2/400/AN-000048-v1.1-PDM-Digital-Output-1112735.pdf>
- [21] *¼" Free-field Microphone Type 4939* [online]. 2 [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <https://www.bksv.com/media/doc/Bp1851.pdf>
- [22] KEMO L010. In: *Kemo-electronic* [online]. [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <https://www.kemo-electronic.de/images/ipics/L010/frequenzdiagramm.png>
- [23] *SPH0641LU4H-1* [online]. 2014, 15 [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <http://www.knowles.com/jpn/content/download/5990/105795/version/1/file/SPH0641LU4H-1.pdf>
- [24] *National Instruments* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <http://www.ni.com/cs-cz.html>
- [25] *GRAS 42AP* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <https://www.gras.dk/products/product/257-42AP.html>
- [26] *G.R.A.S. 12AB* [online]. [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <https://www.gras.dk/products/power-module/for-intensity-probes-lemo/product/182-12ab>

Seznam symbolů, veličin a zkratek

FEKT – Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

VUT – Vysoké učení technické v Brně

MEMS – Micro electro mechanical systems, mikroelektromechanický systém

A/D – Analog to digital convertor, analogově digitální převodník

SNR – Signal to noise ratio, poměr signálu a šumu

PDM – Pulse density modulation, pulzně hustotní modulace

Σ - Δ – Sigma – Delta convertor, převodník sigma delta

ASIC – Application specific Integrated circuit, specifický integrovaný obvod

I2S – Integrated Interchip Sound

TDM – time division multiplex

Seznam příloh

Příloha 1. DVD s elektronickou verzí bakalářské práce a naměřenými daty

Příloha 2. Tabulka MEMS mikrofonů

Příloha 2. Tabulka MEMS mikrofonů

<u>Knowles</u>								
Číslo modelu	Rozměry (mm)	Port	Citlivost	SNR	AOP	Min. Frek. (Hz)	Max. Frek. (kHz)	Max. Odběr (uA)
Analog								
SPA1687LR5H-1	3.35 x 2.50 x 0.98	Bottom	-38 +/-1 dBV	65	132	100	10	325
SPA2629LR5H	3.35 x 2.50 x 0.98	Bottom	-38 +/-3 dBV	65	123	100	10	165
SPH1642HT5H-1	3.50 x 2.65 x 1.00	Top	-38 +/-1dBV	65	124	20	20	185
SPM0687LR5H	4.72 x 3.76 x 1.25	Bottom	-40 +/-1dBV (SE) / -35+/-1 dBV	70	130	100		365
SPV1840LR5H-B	2.75 x 1.85 x 0.90	Bottom	-38 +/-3dBV	62.5	123	100	10	60
Digital (PDM)								
SPH0641LU4H-1	3.50 x 2.65 x 0.98	Bottom	-26 +/-1dBFS	64	120	10	80	L: 270 S: 700 U: 1000
SPH0644HM4H-1	3.50 x 2.65 x 0.85	Top	-36 +/-1dBFS	58	131	100	10	900
SPH0644LM4H-1	3.50 x 2.65 x 0.98	Bottom	-37 +/-1dBFS	65.5	132.5	100	10	900
SPK0415HM4H	4.00 x 3.00 x 1.06	Top	-26 +/-3dBFS	61	122	100	10	650
SPK0641HT4H-1	4.00 x 3.00 x 1.00	Top	-26 +/-1dBFS	64.5	120	100	20	L: 270 S: 700
<u>Goertek</u>								
Číslo modelu	Rozměry (mm)	Port	Citlivost	SNR	AOP	Min. Frek. (Hz)	Max. Frek. (kHz)	Max. Odběr (uA)
Analog								
S08OT421/3	3.76x2.95x 1.10	Bottom	-42 +/-3 dB	59	-	-	-	-
S18OB381	3.50 x 2.65 x 0.98	Bottom	-38 +/-1 dB	65	-	-	-	-
Digital								
SD18OB361	3.50 x 2.65 x 0.98	Bottom	-36 +/-1dBFS	65.5	-	-	-	-

<u>InvenSense</u>								
Číslo modelu	Rozměry (mm)	Port	Citlivost	SNR	AOP	Min. Frek. (Hz)	Max. Frek. (kHz)	Max. Odběr (uA)
Analog								
ICS-40212	3.50 x 2.65 x 0.98	Bottom	-38 +/-1 dBV	66	128	35	20	L: 55 H: 165
ICS-40730	4.72 x 3.76 x 3.50	Bottom	-32 +/-1dBV	74	124	25	20	285
ICS-40619	3.50 x 2.65 x 0.98	Top	-38 d +/-1BV	67	132	35	20	L: 55 H: 165
ICS-40310	3.35 x 2.50 x 0.98	Bottom	-37 +/-1dBV	64	112	90	16	23
INMP510	3.35 x 2.50 x 0.98	Bottom	-38 +/-2dBV	65	124	60	20	250
Digital (TDM, PDM, I2S, PDM)								
ICS-52000	4 x 3 x 1	Bottom	-26 +/-1dBFS	65	116	50	20	24
ICS-51360	3.50 x 2.65 x 0.98	Bottom	-36 +/-1dBFS	62	130	50	20	L: 230 S: 590
ICS-43434	3.50 x 2.65 x 0.98	Bottom	-26 +/-1dBFS	65	120	60	20	490
ICS-41352	3.50 x 2.65 x 0.98	Bottom	-26 +/-1dBFS	64	120	-	85	S: 500
<u>Akustica</u>								
Číslo modelu	Rozměry (mm)	Port	Citlivost	SNR	AOP	Min. Frek. (Hz)	Max. Frek. (kHz)	Max. Odběr (uA)
Analog								
BMU551R	3.50 x 2.65 x 1.0	Top	-38 +/-1dBV	66	124	40	12,5	205
BMU563R	3.50 x 2.65 x 0.98	Bottom	-38 +/-1dBV	66	123	40	12,5	60
AKU151	3.42 x 1.70 x 0.93	Top	-38 +/-1dBV	65	124	70	11,5	60
AKU143	3.76 x 2.95x 1	Top	-42 +/-1dBV	65	126	50	11,5	155
Digital (PDM)								
AKU250P	4 x 3 x 1	Top	-26 +/-1dBFS	65	120	32	11,5	775
AKU450P	3.50 x 2.65 x 0.98	Bottom	-26 +/-1dBFS	65	120	40	11,5	730
AKU243	4 x 3 x 1	Top	-26 +/-3dBFS	64	118	50	11	800
<u>AAC Technologies</u>								
Číslo modelu	Rozměry (mm)	Port	Citlivost	SNR	AOP	Min. Frek. (Hz)	Max. Frek. (kHz)	Max. Odběr (uA)

Analog								
AM0502B-nea381-M02	3.50 x 2.65 x 0.98	Bottom	-38 +/-1dBV	66	-	-		-
SM0401L-NEA381-G02	3.76 x 2.95 x 1.10	Bottom	-38 +/-1dBV	65	-	-		-
SM0302-A421-M02	3.10 x 2.50 x 1.10	Bottom	-42 +/-1dBV	66	-	-		-
Digital								
SDM041-263-M03	4 x 3 x 1	Bottom	-26 +/-3dBFS	61	-	-		-
SDM0502B-D263-M03	3.50 x 2.65 x 0.98	Bottom	-26 +/-3dBFS	63	-	-		-
<u>STMicroelectronics</u>								
Číslo modelu	Rozměry (mm)	Port	Citlivost	SNR	AOP	Min. Frek. (Hz)	Max. Frek. (kHz)	Max. Odběr (uA)
Analog								
MP23AB01DH	3.35 x 2.50 x 0.98	Bottom	-38 +/-1dBFS	65	135	100	10	250
Digital (PDM)								
MP34DT01-M	3 x 4 x 1	Top	-26 +/-3dBFS	61	120	100	10	600
MP34DT02	3 x 4 x 1	Top	-26 +/-3dBFS	60	120	100	10	600
<u>Cirrus logic</u>								
Číslo modelu	Rozměry (mm)	Port	Citlivost	SNR	AOP	Min. Frek. (Hz)	Max. Frek. (kHz)	Max. Odběr (uA)
Analog								
CS7331	2.5 x 1.6 x 0.9	Bottom	-38 +/-1dBV	63	124	85	15	60
WM7121	3.76 x 2.95x 1	Bottom	-38 +/-1dBV	65	126	62	13	190
Digital (PDM)								
CS7250	3.50 x 2.65 x 0.98	Bottom	-36 +/-1dBV	66	131	35	13	L: 160 H: 650
CS7257B	3.50 x 2.65 x 0.98	Bottom	-36 +/-1dBV	66	-	-		L: 260 H: 770
WM7216	3.50 x 2.65 x 0.98	Top	-26 +/-1dBV	60	120	62	12	L: 300 H: 950

<u>Infineon</u>								
Číslo modelu	Rozměry (mm)	Port	Citlivost	SNR	AOP	Min. Frek. (Hz)	Max. Frek. (kHz)	Max. Odběr (uA)
Analog								
IM70A135	4 x 3 x 1.2	Bottom	...+/-1dB	70	135	-		-
Digital (PDM)								
IM69D130	4 x 3 x 1.2	Bottom	...+/-1 dB	69	130	-		-
<u>Hosiden</u>								
Číslo modelu	Rozměry (mm)	Port	Citlivost	SNR	AOP	Min. Frek. (Hz)	Max. Frek. (kHz)	Max. Odběr (uA)
Analog								
KRM0300	3.76 x 2.95 x 1.1	Bottom	-42 +/-3 dB	59	-	100	10	70
KRM0500	3.2 x 2.2 x 0.9	Bottom	-42 +/-3 dB	59	-	100	10	70
Digital (PDM)								
KRM5303	3.8 x 2.8 x 1	Bottom	-26 +/-3dBFS	62	-	100	12	550
<u>MEMSensing</u>								
Číslo modelu	Rozměry (mm)	Port	Citlivost	SNR	AOP	Min. Frek. (Hz)	Max. Frek. (kHz)	Max. Odběr (uA)
Analog								
MSM321A3729H9HP-C	3.76 x 2.95 x 1.1	Top	-32 +/-1 dB	65	120	100	10	150
Digital (PDM)								
MSM261D3526Z1A	3.50 x 2.65 x 0.98	Bottom	-26 +/-1 dB	64	120	100	10	670